

# **DESENVOLVIMENTO DE ABSORSORES SONOROS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS**

**ANA FILIPA FREITAS AMORIM PINTO COSTA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JULHO DE 2013

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2012/2013**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmã



## AGRADECIMENTOS

Não poderia concluir este trabalho sem agradecer a todos quantos contribuíram para que ele fosse possível. Coube-me desempenhar a tarefa de idealizar e reunir contributos para a tese de mestrado que me foi atribuída, sabendo que qualquer trabalho desta natureza é sempre um processo coletivo. Foi uma experiência enriquecedora e um convívio inesquecível com pessoas de superior qualidade técnica, profissional e humana. Cumpre-me agradecer...

Em primeiro lugar, ao meu Orientador, Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho, pela oportunidade que me proporcionou de realizar um trabalho numa área estimulante. Pela sua orientação muito exigente e pela ilimitada disponibilidade. Agradeço ainda pelos ensinamentos constantes, pelas experiências transmitidas, pelos conselhos oportunos e pelo encorajamento sistemático. O meu orientador foi uma fonte de inspiração e motivação indispensáveis ao desenvolvimento deste trabalho.

Mas cumpre-me agradecer ainda...

À empresa *Castelhano & Ferreira*, de modo especial ao Dr. Ricardo Ferreira, pela abertura manifestada a este projeto, pela logística e por todos os recursos disponibilizados.

Ao Engenheiro Ricardo Patraquim, pela disponibilidade, ensinamentos práticos, conselhos, sugestões e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Pedro Soares, pela sua colaboração no processo de *design* dos elementos absorvedores desenvolvidos.

Ao Demetris Kanaris, autor do programa utilizado, por todo o apoio prestado ao longo deste processo com disponibilidade imediata, pelos ensinamentos e experiências partilhadas.

Ao Engenheiro António Eduardo Batista da Costa, pela incansável assistência na execução dos ensaios nas câmaras reverberantes. Pela incomparável prontidão, pelos conselhos, ensinamentos e experiências transmitidos e pelo constante encorajamento. Pela amizade manifestada, e pela capacidade de transformar os momentos de trabalho conjunto em verdadeiras experiências de aprendizagem partilhada.

Finalmente uma palavra de gratidão às pessoas mais importantes da minha vida.

Aos meus pais, pelos sacrifícios que fizeram por mim, pela educação e valores que me transmitiram, pelo carinho e pelo apoio incondicional permanente.

À minha irmã, meu exemplo, minha melhor amiga e segunda mãe. Agradeço pelo caminho que sempre me ajudou a abrir, pelo apoio constante, e por nunca ter deixado de acreditar em mim.

Ao Bruno, pelas provas de amizade e pelo apoio sempre manifestado.

Ao Luís Miguel, por estar sempre do meu lado. Pela companhia, apoio, e dedicação constantes ao longo do curso. Por acreditar em mim e pela confiança demonstrada.

Ao Luís Santos, por toda a amizade, apoio e auxílio prestados ao longo destes últimos meses.

A todos os amigos que me acompanharam ao longo destes anos. Pelo incentivo, apoio, conselhos e experiências partilhadas. Pelas maratonas de estudo, pelos convívios fantásticos, e pelos momentos inesquecíveis. Pela festa e pela tristeza, pelas gargalhadas e pelos murmúrios. Os meus amigos estão todos aqui.



## RESUMO

A Acústica de Edifícios assume um papel cada vez mais importante na área da construção, condicionando significativamente a saúde e o bem-estar comum dos utilizadores. O conforto acústico é portanto um objetivo de mais-valia, determinado quer pelas condicionantes da envolvente, quer pelas características do edifício. Emerge assim a necessidade de criar elementos acústicos com a finalidade de corrigir, deste importante ponto de vista, a qualidade de um espaço ou de um compartimento. O presente trabalho enquadra-se neste contexto, com o objetivo de abordar a utilização de elementos acústicos que uma vez introduzidos absorvem energia sonora, em especial nas baixas-frequências (*bass-traps* ou *bass-corners*).

Os protótipos desenvolvidos em colaboração com a firma *Castelhano & Ferreira*, destinam-se essencialmente a pequenas salas sob o ponto de vista acústico, tais como estúdios de gravação, salas de ensino e prática da música, pequenos espaços para conferências e projeções, *home-cinemas*, etc., onde os modos próprios nas baixas-frequências são um problema acústico.

Após a exposição teórica da matéria em apreço e de uma descrição do estudo efetuado, fez-se uma identificação das características geométricas dos *bass-traps*. Nesta fase, em que se idealiza o painel absorvedor, foram definidos os materiais, a dimensão, forma e quantidade de elementos constituintes do protótipo.

O tipo de absorvedor utilizado é desde logo definido através dos diversos elementos que o compõem. Para isso utilizou-se um programa acústico, especializado em painéis absorvedores, de forma a modelar os painéis e estudar a propagação das ondas em meios porosos. Avaliou-se o comportamento dos painéis idealizados consoante a variação dos respetivos parâmetros.

Foram dimensionados dois tipos de elementos absorvedores diferentes: membrana e perfurados. Fizeram-se variar as suas características internas: caixa-de-ar, utilização ou não de material poroso absorvedor e variação da espessura deste no interior do painel.

Após as fases de estudo e construção do protótipo, realizou-se o estudo paramétrico experimental (laboratorial), com as medições de desempenho, quer em câmara reverberante, quer na utilização mais prática em sala acusticamente pequena (para isto foi feita uma simulação em câmara reverberante mais pequena). Todas as configurações dos painéis apresentados foram testadas em duas disposições diferentes: ao canto e ao centro da câmara reverberante de modo a testar a variação da absorção sonora.

Esta metodologia permite determinar o tempo de reverberação e a absorção sonora equivalente associados a cada uma das amostras desenvolvidas.

Na sequência do método realizado fez-se uma análise dos resultados obtidos, comentando a influência de cada parâmetro analisado no comportamento final do elemento absorvedor. Fez-se ainda uma comparação dos resultados obtidos com a bibliografia estudada e o programa utilizado.

Os resultados obtidos foram bastante interessantes e a abordagem utilizada, no que se refere ao conceito de elementos modulares, revelou potencial e boas características de absorção nas baixas frequências para a maior parte dos painéis.

Finalmente, abordaram-se reflexões relativas ao decorrer dos trabalhos, onde se evidenciam as limitações, as potencialidades de todo o projeto e possíveis desenvolvimentos futuros na área.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acústica de edifícios, absorvedor sonoro, baixas-frequências, madeira, *bass-traps*.





## ABSTRACT

Building acoustics has an increasingly important role in the construction sector, since it deeply influences the user health and well-being. Acoustic comfort represents therefore an added value, determined both by the surrounding environment and buildings' characteristics. Thus, emerges the need to create acoustic elements in order to correct, from this point of view, the quality space or a room. At this context, the present work aims to address the use of acoustic elements that, once introduced, will absorb sound energy, mainly in low frequencies (*bass-traps* ou *bass-corners*).

The prototypes developed in collaboration with *Castelhano & Ferreira*, were specially intended for small rooms, such as recording studios, music teaching and music practice rooms, small spaces for conferences and projections, home-cinemas, etc., where the eigenmodes in low frequencies are an acoustic problem.

After a theoretical exposure on the subject and a presentation of the study, the geometric characteristics of *bass-traps* were identified. At this stage, the absorbing panel was idealized and the materials, dimensions, shape and quantity of constituent elements of the prototype were carefully defined.

The type of panel used was defined through the various composing elements. To do this, was used an acoustic program, specialized in absorbing panels, in order to model the panels and study the propagation of waves in porous environments. The behavior of the idealized panels' was evaluated according to the variation of the respective parameters.

Two different types of absorbing panels were designed: perforated and membrane. Their internal characteristics were altered: air-box, use or non-use of porous absorber material and thickness variation of the porous material within the panel.

Once the study and the prototype were finished, an experimental (laboratorial) parametric study was conducted, proceeding with the performance measurements both in reverberant chamber and in acoustical small rooms. All configurations of the panels were tested in two different arrangements: corner and in the center of the reverberation chamber in order to test the variation in sound absorption.

This methodology allowed to determine the reverberation time and the equivalent sound absorption referring to each of the samples developed.

Following the performed tasks, was done an analysis of the obtained results with comments on the influence of each parameter analyzed on the final behavior of the absorbing element. Then it was done a comparison between the results obtained through the theoretical method with the experimental results.

The results were very interesting and the used approach on the modular elements revealed potential and good absorption characteristics at low frequencies for the majority of the panels.

At last, related to the course of the works, were made home reflections where there was evidence of the limitations and the potentialities of the whole project and possible future developments in the area.

**KEYWORDS:** Building acoustics, *bass-traps*, low frequencies, sound absorber, wood.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE QUADROS .....</b>	<b>XV</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA .....	3
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. NOÇÕES BÁSICAS DE ACÚSTICA .....	5
2.2.1. O SOM E O RUÍDO.....	5
2.2.2. PRESSÃO SONORA .....	6
2.2.3. FREQUÊNCIA .....	8
2.3. ACÚSTICA DE SALAS .....	10
2.3.1. INTRODUÇÃO .....	10
2.3.2. ABSORÇÃO SONORA E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA .....	10
2.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	12
2.3.4. MODOS PRÓPRIOS DE UMA SALA .....	13
2.3.5. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO .....	13
2.3.5.1 Introdução .....	13
2.3.5.2 Materiais Porosos.....	13
2.3.5.3 Ressonadores de Helmholtz .....	15
2.3.5.4 Membranas .....	17
2.4. SALAS ACUSTICAMENTE PEQUENAS.....	17
2.4.1. INTRODUÇÃO .....	17
2.4.2. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA .....	18
2.4.3. MODOS ACÚSTICOS .....	19
2.4.4. DIAGRAMA DE BOLT .....	21
<b>3 ABSORVEDORES ACÚSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS.....</b>	<b>23</b>
3.1. SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS .....	23
3.2. CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR NA CONCEÇÃO DE UM <i>BASS-TRAP</i> .....	29
3.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DE SISTEMAS ABSORVEDORES SONOROS .....	31
3.3.1. ASPETOS CONSTRUTIVOS .....	31

3.3.2. MATERIAIS POROSOS ABSORVEDORES .....	32
<b>4 DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE PAINÉIS ACÚSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS.....</b>	<b>33</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	33
4.2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO.....	33
4.3. DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS ABSORVEDORES PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS .....	35
4.3.1. ANÁLISE CONCEPTUAL .....	35
4.3.1.1 Painéis Desenvolvidos .....	35
4.3.1.2 Pannel Liso com Lã-de-Rocha de 200 mm (L200).....	36
4.3.1.3 Pannel Perfurado com Lã-de-Rocha de 200 mm (P200) .....	37
4.3.1.4 Pannel Perfurado com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100) .....	38
4.3.1.5 Pannel Liso com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100).....	39
4.3.2. ESTRUTURA.....	40
<b>5 ENSAIO EM CÂMARA REVERBERANTE.....</b>	<b>45</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO .....	45
5.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO .....	46
5.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	46
5.2.2. GAMA DE FREQUÊNCIAS .....	46
5.2.3. DISPOSITIVOS DE ENSAIO .....	47
5.2.3.1 Câmara Reverberante e Campo Sonoro Difuso .....	47
5.2.3.2 Provêtes de Ensaio .....	48
5.3. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO .....	49
5.3.1. INTRODUÇÃO .....	49
5.3.2. RECEPTORES E FONTES SONORAS .....	49
5.3.3. MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO .....	50
5.4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS .....	51
5.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO E ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE .....	51
5.4.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.....	52
<b>6 RESULTADOS EM CÂMARA REVERBERANTE.....</b>	<b>53</b>
6.1. INTRODUÇÃO .....	53
6.2. ENSAIOS E RESULTADOS OBTIDOS .....	54
6.2.1. ENSAIOS REALIZADOS .....	54
6.2.2. RESULTADOS.....	55
6.2.2.1 Parâmetros Avaliados .....	55
6.2.2.2 Área de Absorção Sonora Equivalente ( $A_{obj}$ ) .....	55
6.2.2.3 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_1$ ) .....	57
6.2.2.4 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_2$ ) .....	58
6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	60
6.3.1. PAINÉIS SEM MATERIAL POROSO ABSORVEDOR .....	60
6.3.1.1 Objetivo.....	60
6.3.1.2 Pannel Liso Sem Lã-de-Rocha (L0) .....	60
6.3.1.3 Pannel Perfurado Sem Lã-de-Rocha (P0).....	61
6.3.2. PAINÉIS COM MATERIAL POROSO ABSORVEDOR .....	62
6.3.2.1 Pannel Perfurado Com Lã-de-Rocha de 200 mm (P200) .....	62

6.3.2.2 Painel Perfurado Com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100) .....	63
6.3.2.3 Painel Liso Com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100).....	63
6.3.2.4 Painel Liso Com Lã-de-Rocha de 200 mm (L200).....	64
6.3.3. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ-DE-ROCHA .....	65
6.3.3.1 Objetivo .....	65
6.3.3.2 Painéis Lisos .....	65
6.3.3.3 Painéis Perfurados .....	65
6.3.4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL .....	66
<b>6.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CÂMARA REVERBERANTE .....</b>	<b>67</b>
 <b>7 RESULTADOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA” .....</b>	 <b>69</b>
<b>7.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>7.2. ENSAIOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA” .....</b>	<b>70</b>
7.2.1. ENSAIOS REALIZADOS.....	70
7.2.2. RESULTADOS.....	70
7.2.2.1 Área de Absorção Sonora Equivalente ( $A_{obj}$ ) .....	70
7.2.2.2 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_1$ ).....	71
7.2.2.3 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_2$ ).....	72
<b>7.3. RESULTADOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA” .....</b>	<b>73</b>
7.3.1. OBJETIVO .....	73
7.3.2. RESULTADOS.....	73
7.3.2.1 Objetivo .....	73
7.3.2.2 Painel Perfurado com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100).....	73
7.3.2.3 Painel Liso com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100) .....	74
<b>7.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA” .....</b>	<b>75</b>
 <b>8 CONCLUSÕES .....</b>	 <b>77</b>
<b>8.1. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>77</b>
<b>8.2. LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES .....</b>	<b>79</b>
<b>8.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>80</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>81</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sala acústica: estúdios de gravação [4] .....	2
Figura 1.2 - Sala acústica: sala de música [5] .....	2
Figura 2.1 – a) visão instantânea das regiões comprimidas e rarefeitas de uma onda de som no ar; b) variação da pressão atmosférica: zonas comprimidas e zonas rarefeitas [Adaptado de 6] .....	5
Figura 2.2 - Sobreposição das variações de pressão relativamente à pressão atmosférica [7] .....	6
Figura 2.3 - Pressão sonora $p$ e níveis de pressão sonora $L_p$ [Adaptado de 6] .....	8
Figura 2.4 - Relação entre o comprimento de onda e a frequência [Adaptado de 10] .....	9
Figura 2.5 – Onda sonora incidindo numa superfície: A, B, C: reflexões; D: transmissão; E, F, G, H, I, J, K: dissipações de energia em forma de calor [6] .....	10
Figura 2.6 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [2] .....	14
Figura 2.7 - Características da absorção sonora de alcatifas sobre feltro, aumentando a espessura de 1 para 2: 1 – Delgada (tipo lisa); 2 – Espessa (tipo veludo) [13] .....	14
Figura 2.8 - Ressonador de Helmholtz .....	15
Figura 2.9 - Ressonador modelado por um sistema massa/mola .....	15
Figura 2.10 - Esquema de painéis com ranhuras [Adaptado de 7] .....	16
Figura 2.11 - Painel perfurado CF6 [14] .....	17
Figura 2.12 - Painel ranhurado CFRF 3/8 [14] .....	17
Figura 2.13 - Funcionamento de um painel ressonante [7] .....	17
Figura 2.14 - Resposta em frequência idealizada [15] .....	18
Figura 2.15 - Sala com resposta em frequência problemática, com muitos modos acústicos proeminentes nas baixas frequências [Adaptado de 15] .....	18
Figura 2.16 - Visualização dos modos usando conceito de "raios acústicos" [Adaptado de 15] .....	19
Figura 2.17 - Representação de uma sala com as dimensões L, W e H [15] .....	20
Figura 2.18 - Largura de banda de um modo acústico [Adaptado de 15] .....	21
Figura 2.19 - Diagrama de Bolt [Adaptado de 16] .....	21
Figura 3.1 - Quatro formas possíveis de absorção de baixa frequência para os cantos de uma sala: (A) ressonador de Helmholtz; (B) <i>tube-trap</i> ; (C) <i>snap-trap</i> ; (D) <i>corner killers</i> [6] .....	23
Figura 3.2 - Bass-traps: (A) Havsvåg BT; (B) Kubus; (C) Kotka; (D) Basskutt [18] .....	25
Figura 3.3 - Possibilidades de montagem - painel <i>kotka</i> [18] .....	25
Figura 3.4 - Bass-traps: (A) <i>Super bass extreme</i> ; (B) <i>Vari bass</i> ; (C) <i>Wave wood bass-trap</i> ; (D) <i>Super bass 90 premium</i> [Adaptado de 19] .....	26
Figura 3.5 - Esquema de montagem do <i>wave wood bass-trap</i> [Adaptado de 19] .....	26
Figura 3.6 - Bass-traps: (A) <i>Mega-traps</i> ; (B) <i>Mondo traps/Corner mondo traps</i> ; (C) <i>Mini traps</i> ; (D) <i>Bare traps</i> [20] .....	27
Figura 3.7 – <i>Tube-traps</i> : (A) e (B) e exemplos do seu posicionamento (C e D) [Adaptado de 21 e 22] .....	28
Figura 3.8 - Elementos do circuito e curva de resposta de um <i>tube-trap</i> [Adaptado de 22] .....	29
Figura 3.9- Coeficiente de absorção em materiais porosos ou fibrosos [24] .....	29
Figura 3.10 - Camada porosa sobre parede rígida [24] .....	31
Figura 3.11 - Camada porosa com revestimento perfurado [24] .....	31
Figura 3.12 - Placas acústicas perfuradas [24] .....	31
Figura 3.13 - Placas acústicas estriadas [24] .....	31
Figura 3.14 - Membrana vibrante sobre estrutura de madeira [24] .....	32

Figura 3.15 - Placas de ressonância com fendas [24].....	32
Figura 3.16- Lã de rocha e lã de vidro: dois dos principais materiais porosos absorvedores utilizados nos painéis absorvedores de baixas frequências [24].....	32
Figura 4.1- a) Coeficiente de absorção para incidência normal medido e previsto para um absorvedor de membrana; b) instalação típica de um amortecedor de canto numa sala de reprodução pequena. [Adaptado de 16].....	34
Figura 4.2 - Coeficiente de absorção sonora de três painéis absorvedores tipo membrana: (A) 5 mm de contraplacado com 50 mm de caixa-de-ar; (B) 2 mm de contraplacado com "lã mineral" de 25 mm e caixa-de-ar de 6 mm; (C) igual a (B), mas para um painel de 3 mm de espessura. [Adaptado de 6] ...	34
Figura 4.3 - Coeficiente de absorção para incidência aleatória para diferentes absorvedores de Helmholtz: — orifício pequeno, cavidade rasa; — orifício grande, cavidade rasa; * * * * orifício pequeno, cavidade profunda; - - - orifício grande, cavidade profunda. [Adaptado de 16]	35
Figura 4.4 – Dimensões [cm] em planta: painel liso com lã-de-rocha de 200 mm (L200) .....	36
Figura 4.5 - Coeficiente de absorção sonora do painel liso com lã-de-rocha de 200 mm (L200) em função da frequência [25] .....	37
Figura 4.6- Dimensões [cm] em planta: painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm (P200).....	37
Figura 4.7 - Coeficiente de absorção do painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm (P200) em função da frequência [25] .....	38
Figura 4.8 – Dimensões [cm] em planta: painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100) .....	38
Figura 4.9 - Coeficiente de absorção do painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100) em função da frequência [25] .....	39
Figura 4.10 – Dimensões [cm] em planta: painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) .....	39
Figura 4.11 - Coeficiente de absorção do painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) em função da frequência [25] .....	40
Figura 4.12 - Modelo estruturante do protótipo desenvolvido para o painel absorvedor de baixas frequências - <i>bass-corner</i> [26] .....	41
Figura 4.13 - Estrutura preparada com arames e "camarões" para suportar a lã-de-rocha de 100 mm [Fotografia da Autora] .....	42
Figura 4.14 - Painel após a colocação de lã-de-rocha de 100 mm [Fotografia da Autora] .....	42
Figura 4.15 - Colocação do painel frontal [Fotografia da Autora] .....	43
Figura 4.16 - Painel liso (L) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora] .....	43
Figura 4.17 - Painel perfurado (P) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora] ..	44
Figura 4.18 - Vista lateral de um painel perfurado (P) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora] .....	44
Figura 5.1 - Entrada da câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP [Fotografia da Autora].....	45
Figura 5.2 – Aspeto interior da câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP [Fotografia da Autora] .....	45
Figura 5.3 - Planta esquemática da câmara reverberante R1 do laboratório de Acústica da FEUP .....	46
Figura 5.4- Área de absorção sonora equivalente na câmara reverberante vazia ( $A_0$ ) comparada com o limite máximo da norma NP ISO 354 [27] .....	48
Figura 5.5 - Posição exemplificativa dos recetores e fontes sonoras durante o ensaio .....	50



Figura 6.1 – Disposição C dos painéis durante os ensaios: painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante [Fotografia da Autora] .....	53
Figura 6.2 – Painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante (disposição C) .....	53
Figura 6.3 – Disposição (M) dos painéis durante os ensaios: painéis agrupados no meio da câmara reverberante [Fotografia da Autora] .....	54
Figura 6.4 – Painéis agrupados no meio da câmara reverberante (disposição M) .....	54
Figura 6.5 - Área de absorção sonora equivalente - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	57
Figura 6.6 – “Coeficiente” de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ ) .....	58
Figura 6.7 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ ) .....	60
Figura 6.8 - Área de absorção sonora equivalente de um painel liso (L) sem lã-de-rocha - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	61
Figura 6.9 - Área de absorção sonora de um painel perfurado (P) sem lã-de-rocha - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	61
Figura 6.10 - Área de absorção sonora de um painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	62
Figura 6.11 - Área de absorção sonora de um painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	63
Figura 6.12 - Área de absorção sonora de um painel liso com lã-de-rocha de 100 mm - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) ...	64
Figura 6.13 - Área de absorção sonora de um painel liso com lã-de-rocha de 200 mm - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) ...	64
Figura 6.14 - Influência da lã-de-rocha no interior dos painéis lisos de 5 mm de espessura - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	65
Figura 6.15 - Influência da lã-de-rocha no interior dos painéis perfurados de 5 mm de espessura - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	66
Figura 6.16 – Áreas de absorção sonora equivalentes dos painéis lisos (L) e perfurados (P), com e sem lã-de-rocha (colocados nos cantos) - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	66
Figura 7.1 - Disposição C dos painéis na simulação de uma “sala real”: painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante [Fotografia da Autora] .....	69
Figura 7.2 – Esquema dos painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante .....	69
Figura 7.3 - Área de absorção sonora equivalente - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	71
Figura 7.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ ) .....	71
Figura 7.5 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ ) .....	72
Figura 7.6 - Área de absorção sonora equivalente - $A_{obj}$ ( $m^2$ ) .....	73
Figura 7.7 - Área de absorção sonora ( $A_{obj}$ ) do painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100) .....	74
Figura 7.8 - Área de absorção sonora ( $A_{obj}$ ) do painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) .....	74



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 - Bandas de terço de oitava medidas durante os ensaios em câmara reverberante .....	47
Quadro 5.2 - Limite da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia [27] .....	48
Quadro 5.3- Valores de $m'$ para várias condições de humidade relativa, em função da frequência [Adaptado de 2].....	49
Quadro 6.1- Ensaios realizados em câmara reverberante.....	54
Quadro 6.2 - Área de absorção sonora equivalente - $A_{obj}$ (m <sup>2</sup> ).....	55
Quadro 6.3 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ ) .....	57
Quadro 6.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ ) .....	59
Quadro 7.1 - Ensaios realizados em “sala acusticamente pequena” .....	70
Quadro 7.2 - Área de absorção sonora equivalente - $A_{obj}$ (m <sup>2</sup> ) .....	70
Quadro 7.3 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ ) .....	71
Quadro 7.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ ) .....	72



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- $A$  – Absorção sonora equivalente ( $\text{m}^2$ )
- $A_T$  - Área de absorção sonora equivalente do provete ( $\text{m}^2$ )
- $c$  – Celeridade ( $\text{m/s}$ )
- $d$  – Largura da caixa-de-ar ( $\text{cm}$ )
- $e$  – Espessura ( $\text{cm}$ )
- $f$  – Frequência ( $\text{Hz}$ )
- $f_0 / f_{\text{ress}}$  – Frequência de ressonância ( $\text{Hz}$ )
- $H$  – Dimensão da sala ( $\text{m}$ )
- $I$  – Intensidade sonora ( $\text{W/m}^2$ )
- $I_0$  - Intensidade sonora de referência ( $10^{-12} \text{ W/m}^2$ )
- $L_I$  - Nível de intensidade sonora ( $\text{dB}$ )
- $L_p$  - Nível de pressão sonora ( $\text{dB}$ )
- $L_p(t)$  - Nível de pressão sonora médio, no instante  $t$ , calculado para um número total de  $N$  decaimentos
- $L_{pn}(t)$  - Nível de pressão sonora do decaimento de ordem  $n$ , no instante  $t$
- $L_W$  - Nível de potência sonora ( $\text{dB}$ )
- $l$  – Comprimento ( $\text{m}$ )
- MDF – *Medium density fiberboard*
- $m$  – Massa superficial do painel ( $\text{kg/m}^2$ )
- NRC – *Noise reduction coefficient*
- $p$  – Pressão sonora ( $\text{Pa}$ )
- $p_0$  - Pressão sonora de referência ( $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ )
- $P$  – Percentagem de perfuração de um painel de madeira (%)
- PETG - *Polyethylene terephthalate glycol-modified*
- $r$  – Distância ( $\text{m}$ ) / raio de perfuração ( $\text{cm}$ )
- $S$  – Área ( $\text{m}^2$ )
- $t$  – Temperatura do ar ( $\text{K}$ )
- TR – Tempo de reverberação ( $\text{s}$ )
- $T$  – Período ( $\text{s}$ )
- $v_x$  - Velocidade da partícula ( $\text{m/s}$ )
- $V$  – Volume ( $\text{m}^3$ )
- $W$  – Potência sonora ( $\text{W}$ ) / largura dos painéis perfurados ( $\text{m}$ ) / dimensão da sala ( $\text{m}$ )
- $Z_s$  - Impedância acústica ( $\text{rayl}$ )

$\alpha$  - Coeficiente de absorção sonora

$\alpha_{st}$  - Coeficiente de absorção sonora para campo difuso / coeficiente de absorção estatístico

$\alpha_w$  - Coeficiente de absorção sonora ponderado

$\theta$  - Temperatura (°C)

$\theta_0$  - Ângulo de incidência

$\xi$  - Impedância superficial específica do meio

$\lambda$  - Comprimento de onda (m)

$\rho$  - Massa volúmica (kg/m³)

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A Acústica de Edifícios tem vindo a assumir um papel cada vez mais importante ao nível da construção, com reflexos evidentes na qualidade de vida das pessoas. Todas as salas destinadas à música, ao teatro e ao cinema, têm hoje de ser submetidas a um estudo acústico, porquanto cada um destes espaços prossegue uma funcionalidade específica. Perante salas com diferentes funcionalidades, há necessariamente diferentes e especiais modos de abordagem e tratamento acústico. Salas grandes ou pequenas sob o ponto de vista acústico, devem ser analisadas separadamente conforme a sua utilização específica e as condicionantes do espaço envolvente.

A procura do conforto e do bem-estar acústicos é também potenciada por imposições legais, uma vez que a legislação em vigor impõe valores limites ao tempo de reverberação e área de absorção sonora equivalente [1].

Durante a fase de projeto, o técnico qualificado em acústica tem como objetivo garantir não só a qualidade do som no interior dos espaços, mas também o correto isolamento sonoro dos edifícios. Porém, o desconhecimento e negligência frequentes por parte dos arquitetos e/ou donos-de-obra, conduzem a erros acústicos que condicionam e às vezes mutilam a utilização de determinado espaço. Aqui se entronca uma das perspetivas de análise da Acústica de Edifícios, incidente no estudo e qualidade do som produzido no interior dos edifícios – a correção acústica.

Ao longo dos anos, o tratamento acústico de salas tendia a restringir-se a grandes ambientes como teatros e salas de concertos. Uma possível causa deste desleixo seria o considerado elevado custo do contrato de um profissional em acústica. Nesses tempos, tratar acusticamente uma sala de aula, uma sala de projeção de filmes, ou até uma sala doméstica dedicada à audição de música, era considerado simplesmente um luxo.

Contudo, as salas acusticamente pequenas têm sido cada vez mais submetidas a estudo e análise da qualidade do som. A correção acústica nesta área está em constante evolução. A maior dificuldade no tratamento acústico destes espaços - salas de ensino/prática da música, estúdios de gravação, *home-cinemas*, etc. (Figuras 1.1 e 1.2) está no controlo das baixas frequências aí emitidas.

Nas baixas frequências, estes espaços com dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda, são dominados por ondas estacionárias, em algumas frequências características, devido à criação de modos próprios [2].

A necessidade de absorção destas frequências em salas de pequenas dimensões, impõe a concretização de elementos acústicos bem parametrizados com a finalidade de corrigir determinado compartimento. Estas salas necessitam de requalificação com vista a atingir outra qualidade sonora, suficiente para garantir uma boa audibilidade dos utilizadores. Esse padrão de qualidade garante-se no respeito de certos parâmetros, como por exemplo, o tempo de reverberação e a resposta em frequência.

Surgem, neste contexto, os *bass-traps* como absorvedores de energia acústica, que são projetados para amortecer a energia do som de baixa frequência. Como quase todos os dispositivos de absorção acústica, os *bass-traps* funcionam através da transformação da energia sonora em calor pelo atrito [3].



Figura 1.1 – Sala acústica: estúdios de gravação [4]



Figura 1.2 - Sala acústica: sala de música [5]

## 1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como propósito o estudo e desenvolvimento de absorvedores acústicos de baixas frequências em colaboração com a firma *Castelhano & Ferreira*, para salas acusticamente pequenas, como as salas de ensino/prática da música, estúdios de gravação, *home-cinemas*, etc. Os protótipos construídos pretendem responder às necessidades da firma em desenvolver elementos modelares, facilmente transportáveis e que se adaptem às diversas características das salas, sem descuidar a sua funcionalidade acústica. A *Castelhano & Ferreira* participa de forma ativa no desenvolvimento dos protótipos, contribuindo logística e tecnicamente.

Assim, após a exposição do conhecimento genérico relativo ao tema, são propostos os seguintes objetivos:

- Identificação das características geométricas dos *bass-traps*, onde se definem a dimensão, forma e quantidade de elementos constituintes do protótipo;
- Definição do tipo de absorvedor: poroso, de membrana ou ressoador (ou uma conjugação dos diversos tipos);
- Escolha dos possíveis materiais a utilizar (MDF, espumas de poliuretano, espuma de melamina, membranas de PETG, etc.);
- Modelação do protótipo e identificação da tecnologia utilizada;
- Construção de protótipos;



- Estudo experimental/laboratorial, quer em câmara reverberante quer em “sala acusticamente pequena”;
- Comparação dos resultados obtidos pelo método teórico e os resultados experimentais.

### 1.3. ESTRUTURA

A dissertação está estruturada em oito capítulos sucintamente descritos nos parágrafos seguintes.

No presente capítulo é apresentado o enquadramento do tema do trabalho, descrevendo-se a importância deste na área da construção, bem como as suas problemáticas mais comuns. São ainda descritos os objetivos estipulados para este estudo.

No segundo capítulo abordam-se os fundamentos teóricos relacionados com o tema, sendo apresentados os principais conceitos e definições para melhor entendimento da matéria.

No terceiro capítulo faz-se uma apresentação dos painéis absorvedores de baixas frequências, caracterizando os seus componentes e funções. Apresentam-se os diversos tipos de absorvedores existentes mais eficazes nas baixas frequências: *bass-trap*, *bass-corner* e *tube-trap*. Nesta fase é idealizado o painel absorvedor (materiais, forma e elementos constituintes) e através da análise efetuada anteriormente faz-se a previsão do comportamento acústico do protótipo.

No quarto capítulo aborda-se o estudo relativo à modelação da absorção sonora nos painéis acústicos e os resultados obtidos consoante a variação dos parâmetros no elemento absorvedor desenvolvido. Posteriormente são desenvolvidas várias soluções possíveis, caracterizando os elementos constituintes das amostras.

O quinto capítulo tem como propósito a descrição do método de ensaio do painel desenvolvido e as condições de medição da absorção sonora em câmara reverberante. Com base na Norma NP EN ISO 354 enumeram-se os equipamentos utilizados, assim como os ensaios realizados. Posteriormente, tratam-se os resultados obtidos em câmara reverberante, apresentando as áreas de absorção sonora equivalente em função da frequência.

No sexto e sétimo capítulos comparam-se os resultados obtidos pelos resultados previstos e pelo método experimental. São avaliadas as diversas soluções quer em câmara reverberante quer em “sala acusticamente pequena”, evidenciando semelhanças ou diferenças entre elas, bem como o seu desempenho a nível acústico. A solução mais eficiente será aquela que melhor comportamento apresente nesta área de estudo. Nesta fase justificam-se os valores que apresentem grandes discrepâncias comparativamente aos restantes.

Por último, no oitavo capítulo, são apresentadas as conclusões gerais do trabalho bem como as perspetivas de possíveis desenvolvimentos futuros.



## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se conceitos e definições de interesse para a realização do trabalho, fazendo ainda referência à importância da correção acústica nos edifícios. Dá-se especial relevo aos conceitos de absorção sonora, tempo de reverberação, materiais e sistemas absorventes sonoros e respetivas aplicações com vista ao bom desempenho acústico. São referenciados igualmente alguns aspetos característicos do comportamento acústico de salas pequenas sob este ponto de vista. É feita uma análise das suas respostas em frequência e os seus modos próprios.

### 2.2. NOÇÕES BÁSICAS DE ACÚSTICA

#### 2.2.1. O SOM E O RUÍDO

O som pode ser definido como uma vibração mecânica, isto é, uma variação de pressão num meio elástico percebida pelo ouvido humano [6]. É uma sensação auditiva resultante das alterações de pressão (Figura 2.1) que se propagam no ar e que têm como origem uma fonte de vibração.

Fisicamente, o estímulo sonoro trata-se de uma vibração de um meio elástico (variação de pressão no caso do ar) que, depois de estimulado transmite esse estímulo às moléculas ou partículas até chegarem ao ouvido [2]. É de salientar que as vibrações não detetadas pelo ouvido humano não se enquadram nesta definição de “som”.

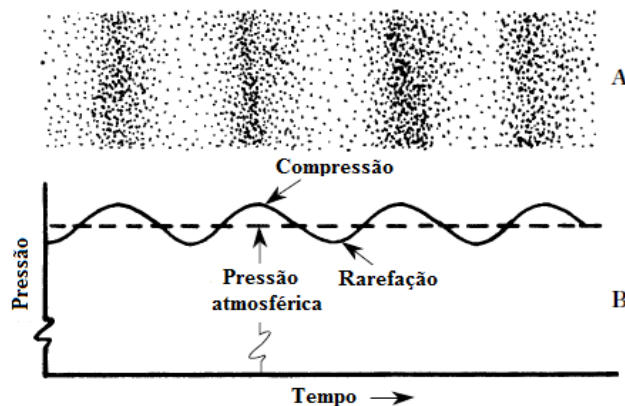


Figura 2.1 – a) visão instantânea das regiões comprimidas e rarefeitas de uma onda de som no ar; b) variação da pressão atmosférica: zonas comprimidas e zonas rarefeitas [Adaptado de 6]

As sensações auditivas consideradas agradáveis ou com significado para o ouvinte podem assim ser definidas como som. Todas as outras sensações que não têm qualquer significado para o ouvinte e que são desagradáveis são caracterizadas como ruído. O ruído pode ainda ser descrito como o som dos excessos ou som da ineficiência mecânica.

A celeridade ou a velocidade de propagação das ondas sonoras, ou seja, da propagação da variação de pressão no ar, varia com a temperatura de acordo com a expressão (2.1):

$$c = 20,045\sqrt{t} \quad \text{com } t(K) = 273,15 + \theta (^{\circ}C) \quad (2.1)$$

### 2.2.2. PRESSÃO SONORA

A variação da pressão sonora é propagada pela colisão das moléculas ou partículas do meio, umas contra as outras sucessivamente, mas sem o seu deslocamento na direção de propagação. A sua propagação é representada por uma série de compressões e rarefações (Figura 2.1).

O ser humano consegue detetar variações de pressão desde  $10^{-5}$  até  $10^7$  Pa. Assim são estas pequenas variações em torno da pressão atmosférica que são percecionadas ao ouvido humano como som (Figura 2.2).

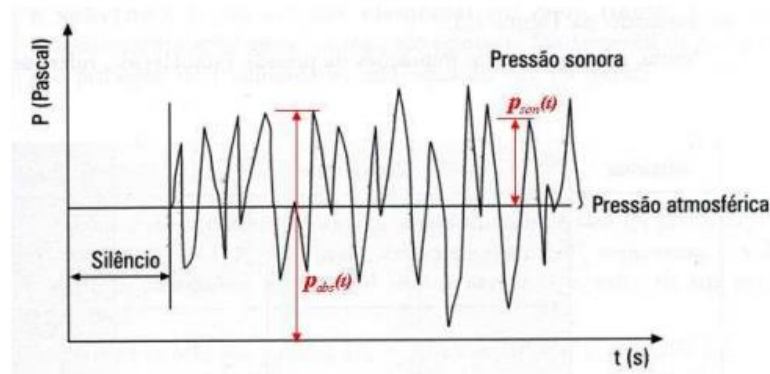


Figura 2.2 - Sobreposição das variações de pressão relativamente à pressão atmosférica [7]

A análise da propagação sonora pode ainda ser feita através do estudo da intensidade e da potência sonora.

A intensidade do som é a particularidade que permite caracterizar se um som é forte ou fraco e depende da energia que a onda sonora transfere. Fisicamente é a quantidade média de energia que atravessa por segundo uma área de  $1 \text{ m}^2$  e quantifica-se em  $\text{W/m}^2$  [2]. É chamada mínima intensidade física, ou *limiar de audibilidade*, o menor valor da intensidade sonora ainda audível:  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Por sua vez, a máxima intensidade física, ou *limiar de dor*, é o maior valor da intensidade sonora suportável pelo ouvido:  $I_{max} = 10 \text{ W/m}^2$  [8].

A fim de caracterizar quantitativamente uma fonte sonora, foi definida uma escala de potência sonora, com uma potência de referência de  $W_0 = 10^{-12} \text{ W}$  [8]. A potência sonora é assim uma característica da fonte e não do estímulo criado por essa fonte.

A intensidade, potência e pressão sonora estão relacionadas entre si da seguinte forma (2.2):

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (2.2)$$

onde,  $I$  – intensidade sonora ( $\text{W/m}^2$ );

$W$  – potência sonora ( $\text{W}$ );

$r$  – distância ( $\text{m}$ );

$p$  – pressão sonora ( $\text{Pa}$ );

$\rho$  – massa volúmica (ar)  $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ;

$c$  – celeridade ( $\text{m/s}$ )  $\approx 340 \text{ m/s}$ .

O valor mínimo da variação de pressão que um ser humano de audição normal pode ouvir é de cerca de  $10^{-5} \text{ Pa}$ , *limiar da audição*. No outro extremo, o valor máximo a partir do qual a sensação auditiva passa de ruído a dor dá-se com uma variação de pressão de cerca de  $100 \text{ Pa}$  – *limiar da dor*. No domínio da pressão, a gama de audibilidade situa-se na ordem dos  $10^7$ .

Uma vez que o ouvido não reage de forma linear aos estímulos, mas sim de forma quase logarítmica, utiliza-se uma outra unidade para avaliar o nível de pressão sonora – o *decibel* ( $\text{dB}$ ). Assim, é usada a seguinte expressão (2.3):

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad \text{ou} \quad L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad (2.3)$$

sendo:  $p_0$  - pressão sonora de referência,  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ .

Para além da pressão, o nível de um fenómeno sonoro pode ainda ser caracterizado através dos níveis da intensidade sonora ( $L_I$ ) e da potência sonora ( $L_W$ ) como se verifica nas seguintes expressões (2.4) e (2.5):

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

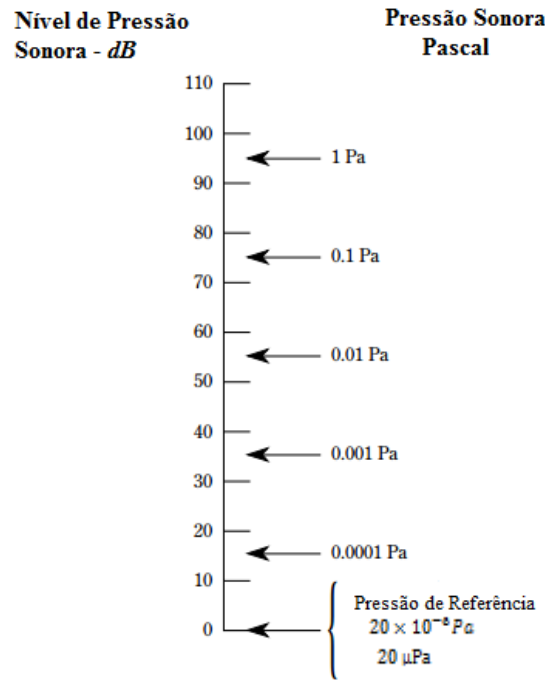
sendo:  $I_0$  - intensidade sonora de referência,  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (\text{dB}) \quad (2.5)$$

sendo:  $W_0$  - potência sonora de referência,  $10^{-12} \text{ W}$ .

O valor da pressão sonora de referência ( $p_0$ ) correspondente ao mínimo audível, é representado na escala *decibel* pelo valor de  $0 \text{ dB}$ . A seguinte correspondência entre pressão sonora e nível de pressão sonora é observada na Figura 2.3:

Uma vez que os níveis de intensidade sonora são definidos numa escala logarítmica, a sua soma é feita de forma não algébrica.

Figura 2.3 - Pressão sonora  $p$  e níveis de pressão sonora  $L_p$  [Adaptado de 6]

Assim, quando se pretende somar níveis de pressão sonora do mesmo valor, recorre-se às seguintes expressões (2.6):

$$L_{Soma} = 10 \cdot \log\left(\frac{p_1^2}{p_0^2} + \frac{p_1^2}{p_0^2}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2p_1^2}{p_0^2}\right) = 10 \cdot \log 2 + 10 \cdot \log \frac{p_1^2}{p_0^2} = 3 + L_1 \Rightarrow L_{Soma} = 3 + L_1 \quad (2.6)$$

Quando se pretende somar níveis sonoros de valores diferentes, o valor resultante é obtido a partir da expressão (2.7):

$$L_{Soma} = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.7)$$

### 2.2.3. FREQUÊNCIA

Uma das características fundamentais do som é a frequência  $f$ , que se define como o número de variações de pressão da fonte emissora por segundo. A unidade da frequência é o *hertz* (Hz). Quase todos os sons contêm diferentes frequências e uma fonte sonora é muitas vezes diferenciável de outra pelas frequências que emite, como por exemplo a variação do ruído de um motor de um grande barco (que tem um soar grave devido à predominância de emissão de baixas frequências) e uma serra elétrica (que tem um soar agudo devido à predominância de emissão de frequências elevadas).

O ser humano (enquanto jovem e de audição normal) ouve aproximadamente entre os 20 e os 20 kHz. Em Acústica de Edifícios distinguem-se três grandes zonas de frequência [2]:

Frequências Graves:	20 a 355 Hz
Frequências Médias:	355 a 1.410 Hz
Frequências Agudas:	1.410 a 20.000 Hz

As frequências são geralmente associadas em bandas de dimensões normalizadas, isto é, de larguras de bandas bastante definidas. Frequentemente utilizam-se as de 1/1 oitava e 1/3 de oitava e é possível converter medições de níveis de pressão sonora de bandas de 1/3 de oitava para bandas de 1/1 oitava. Basta somar logaritmicamente os níveis de pressão referentes às três bandas de frequência que constituem uma banda de oitava. Isto garante que todos os valores de níveis de pressão sonora em bandas de oitava serão necessariamente superiores aos níveis em bandas de 1/3 de oitava que lhe deram origem [9].

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) está relacionado com a frequência através da seguinte expressão (2.8):

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \times T \quad (2.8)$$

onde,  $\lambda$  – comprimento de onda (m);

$c$  – celeridade (velocidade de propagação do som no ar) (m/s);

$T$  – período (s);

$f$  – frequência (Hz).

O comprimento de onda define-se como a distância percorrida pelo som durante um período de uma vibração, ou seja, a distância entre dois pontos idênticos consecutivos da onda periódica, e é expresso em metros como se observa na Figura 2.4.

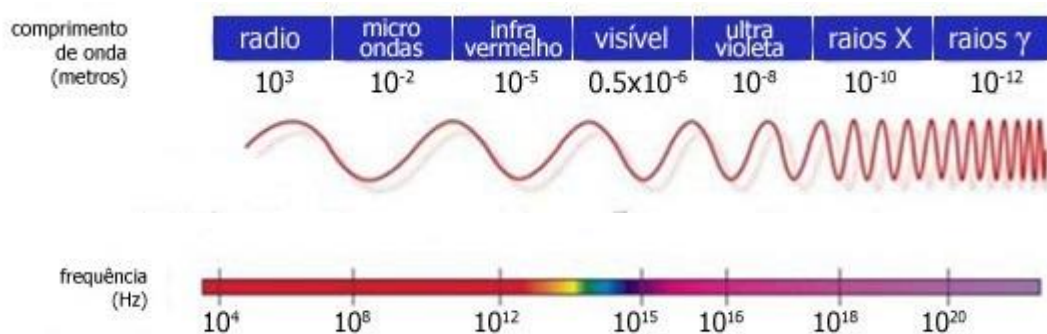


Figura 2.4 - Relação entre o comprimento de onda e a frequência [Adaptado de 10]

O comportamento das ondas sonoras face aos obstáculos é influenciado pelo seu comprimento de onda. Em geral, se o comprimento de ondas é muito superior ao desenvolvimento de um obstáculo, as ondas conseguem ultrapassá-lo. Uma vez que grandes comprimentos de onda estão associados a baixas frequências, essas frequências são geralmente mais audíveis a maiores distâncias e atrás das barreiras. Se o comprimento de onda for inferior ao desenvolvimento de uma dada barreira, por exemplo, a mesma consegue impedir a transposição da onda, criando-se uma zona de sombra atrás da

barreira. Posto isto conclui-se que as barreiras acústicas são bastante mais eficazes nas médias/altas frequências do que nas baixas frequências [9].

## 2.3. ACÚSTICA DE SALAS

### 2.3.1. INTRODUÇÃO

As ondas sonoras que se criam num compartimento onde existe uma fonte sonora em funcionamento podem ser de origem direta ou refletida. As ondas diretas fazem um percurso desde a fonte sonora até ao recetor em linha reta. As ondas refletidas atingem o ouvinte após uma ou sucessivas reflexões nas superfícies da sala [7]. A onda direta é acompanhada por uma série de ondas refletidas que chegam sucessivamente ao ouvido do recetor e que vão formando o campo reverberado. Devido às sucessivas absorções que estas ondas sofrem, vão-se tornando gradualmente mais fracas.

A geometria da sala, a sua utilização e o posicionamento dos diferentes tipos de materiais acústicos permite equilibrar o campo sonoro num campo fechado. Acusticamente, as salas são qualificadas através da relação entre som direto e o som reverberado, quer em termos de amplitude, quer em termos de atraso temporal [7]. Para além destes parâmetros, existem outros que quantificam acusticamente uma sala, sendo eles o tempo de reverberação, definição, clareza, tempo de decaimento curto (EDT), absorção sonora, resposta impulsiva da sala (modos próprios da sala), etc.

### 2.3.2. ABSORÇÃO SONORA E IMPEDÂNCIA ACÚSTICA

Sempre que uma onda sonora atinge qualquer elemento plano, uma parte da energia que lhe está associada é transmitida ao espaço adjacente, outra é refletida pelo elemento plano outra é, ainda, dissipada nesse mesmo elemento, de acordo com a Figura 2.5.

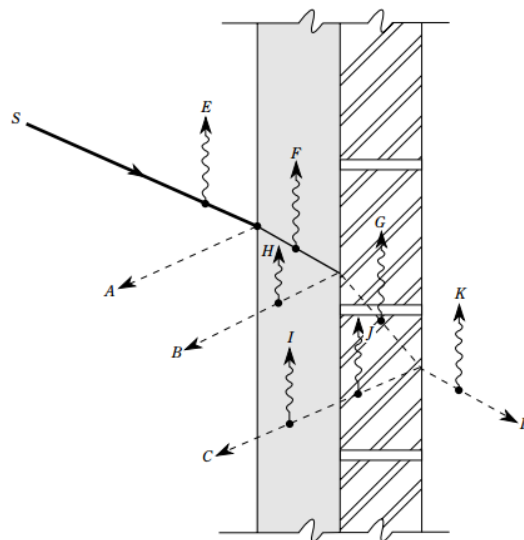


Figura 2.5 – Onda sonora incidindo numa superfície: A, B, C: reflexões; D: transmissão; E, F, G, H, I, J, K: dissipações de energia em forma de calor [6]

A absorção sonora é uma propriedade que os materiais possuem para transformar a energia sonora que sobre eles incide numa qualquer modalidade de energia, geralmente sobre a forma de calor – energia térmica [2]. Por sua vez, o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) é a relação que existe entre a



quantidade de energia sonora que é absorvida por determinado material e aquela que sobre ele incide (2.9):

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorvida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (2.9)$$

Assim, se por exemplo um material possui um coeficiente de absorção sonora de 0,10, significa que absorve cerca de 10% da energia que sobre ele incide. Este coeficiente varia entre 0 e 1. O menor valor – 0, corresponde a um material totalmente refletor, e que portanto apresenta uma absorção nula, como por exemplo o mármore polido. À medida que se vai aproximando da unidade, o material vai sendo cada vez mais absorvente da energia incidente.

A classificação de materiais absorventes também pode ser determinada através de outros parâmetros. Um deles é o NRC (*noise reduction coefficient*), que é definido como a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora nas bandas de frequência dos 250 aos 2.000 Hz (2.10) e que constitui uma medida da eficiência média de absorção.

$$\text{NRC} = (\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000})/4 \quad (2.10)$$

Contudo este método apresenta algumas limitações, pois uma vez que se trata de uma média aritmética numa estreita gama de frequências, existe a possibilidade de vários materiais apresentarem o mesmo valor de NRC e no entanto possuírem características de absorção bastante distintas. E dado que este parâmetro só inclui a gama de frequências dos 250 aos 2000 Hz, não pode definir sistemas de baixas ou altas frequências [2, 9].

O coeficiente de absorção sonora ponderado ( $\alpha_w$ ) é outro parâmetro utilizado na medição da absorção sonora dos materiais. Este coeficiente é calculado a partir dos procedimentos indicados na norma EN ISO 11654 e obtém-se por ajuste ponderado de uma curva de referência usando as bandas de oitava dos 250 aos 4.000 Hz. Depois de se traçar a curva dos valores de  $\alpha$  por banda, determina-se a soma dos desvios positivos entre uma curva de referência móvel e os valores reais. O valor de  $\alpha_w$  é o valor lido para os 500 Hz na curva ajustada de modo que a soma dos desvios positivos seja o máximo possível sem ultrapassar os 0,10. Se uma curva é superior à curva de referência, numa dada frequência, em pelo menos 0,25, junta-se ao resultado do coeficiente de absorção sonora ponderado um indicador L (*low*), M (*medium*) ou H (*high*), consoante acontecer nos 250-500 Hz / 1.000-2.000 Hz / 4.000 Hz respetivamente. Esta norma atribui ainda classes de absorção sonora consoante o material: A ( $\alpha_w \geq 0,90$ ), B ( $0,80 \leq \alpha_w \leq 0,85$ ), C ( $0,60 \leq \alpha_w \leq 0,75$ ), D ( $0,30 \leq \alpha_w \leq 0,55$ ), E ( $0,15 \leq \alpha_w \leq 0,25$ ), e *não classificado* ( $\alpha_w \leq 0,10$ ) [2].

O tubo de ondas estacionárias (ou tubo de Kundt) e o método da câmara reverberante são os dois métodos normalizados existentes para medição do coeficiente de absorção sonora.

O método do tubo de ondas estacionárias ou do tubo de impedância determina o coeficiente de absorção sonora para incidência normal, bem como a impedância superficial de um dado material [9]. É um método que necessita apenas de pequenas amostras, facilitando o desenvolvimento de materiais absorventes. Numa das extremidades do equipamento é colocada uma amostra do material a ensaiar e na outra extremidade do tubo existe um altifalante. Ligando o altifalante, são criadas ondas estacionárias devido à interação da onda incidente com a onda refletida na amostra. Contudo o  $\alpha$  obtido através deste método refere-se unicamente a uma incidência perpendicular das ondas sonoras na amostra e não uma incidência difusa.

Por sua vez o método da câmara reverberante apresenta resultados válidos para incidência difusa. A amostra (de aproximadamente 10 a 12 m<sup>2</sup>) é colocada no solo da câmara reverberante, e o tempo de reverberação é medido. Este método baseia-se na determinação do coeficiente de absorção sonora através da diferença do tempo de reverberação calculado antes e depois da colocação da amostra na sala. A câmara reverberante deve portanto ser tão refletora quanto possível para que a sua área de absorção equivalente seja próxima de zero. As câmaras reverberantes incluem frequentemente difusores suspensos no seu interior para que as reflexões se distribuam o mais uniformemente possível [2,9].

O coeficiente de absorção sonora para incidência aleatória, isto é, para campo difuso, também conhecido como coeficiente de absorção estatístico, é dado pela expressão (2.11) [11]:

$$\alpha_{st} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \, d\theta \quad (2.11)$$

Relacionado com o conceito de coeficiente de absorção sonora está a impedância acústica ( $Z_s$ ). A partir do conhecimento da impedância acústica é possível determinar o coeficiente de absorção sonora para incidência normal, e, posteriormente, estimar o respetivo valor para campo difuso [11]. A impedância acústica pode ser caracterizada como a propagação do som entre dois meios com características distintas e esta diferença está diretamente relacionada com a energia refletida na interface dos diferentes meios. Pode-se assim concluir que quanto maior a impedância de um material, menor será a velocidade de propagação das ondas nesse material. É portanto, uma medida da resistência à propagação do som [9,12]. Impedância acústica está assim definida como a relação entre pressão sonora no ponto de superfície de um elemento e a componente normal à superfície da velocidade de partícula, ( $v_x$ ), no mesmo ponto como se verifica através da seguinte expressão (2.12):

$$Z_s = \frac{p}{v_x} \quad (2.12)$$

A impedância acústica é uma grandeza independente da frequência e expressa-se em *rayl*, correspondente a Pa.s/m [11]. Por sua vez, o coeficiente de absorção sonora, para um dado ângulo de incidência  $\alpha(\theta_0)$ , relaciona-se com a impedância acústica através da seguinte expressão (2.13):

$$\alpha(\theta_0) = 1 - \left| \frac{\xi \cdot \cos \theta_0 - 1}{\xi \cdot \cos \theta_0 + 1} \right|^2 \quad (2.13)$$

onde,  $\theta_0$ - ângulo de incidência;

$\xi$  – impedância superficial específica do meio.

### 2.3.3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação é o intervalo de tempo (medido em s) que um qualquer som demora a extinguir-se. Por definição, é o tempo em que o nível de pressão sonora demora a decair 60 dB (ou seja, que a pressão sonora atinja um milésimo do seu valor inicial). É definido para cada frequência ou bandas de frequência. Por sua vez, a energia sonora estabelecida num recinto fechado onde ocorrem múltiplas reflexões persiste durante tanto mais tempo quanto menor for a capacidade dissipadora de energia assegurada pelos elementos de contorno [11]. O tempo de reverberação de uma sala tem um duplo e antagónico efeito [2]:

- Aumenta o nível sonoro por acréscimo do som refletido ao som direto – efeito favorável;

- Mascara os sons diretos, pois o som refletido vai-se sobrepor ao som direto – o que é negativo na maioria das situações, pois reduz a inteligibilidade da palavra.

Segue-se a expressão mais utilizada e conhecida para a determinação do tempo de reverberação (2.14) – *Fórmula de Sabine*:

$$TR = \frac{0,16 \times V}{A} \quad (2.14)$$

onde, TR – tempo de reverberação (s);

V – volume do compartimento (m<sup>3</sup>);

A – absorção sonora equivalente (m<sup>2</sup>) obtida através da expressão (2.15):

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.15)$$

onde,  $\alpha_i$  – coeficiente de absorção sonora do material i (adimensional);

$S_i$  – superfície real do material i (m<sup>2</sup>).

#### 2.3.4. MODOS PRÓPRIOS DE UMA SALA

Nas baixas frequências, muitas salas, especialmente as salas “acusticamente pequenas” e que têm dimensões na ordem de grandeza do comprimento de onda, são dominadas por ondas estacionárias em algumas frequências características, devido à criação de modos próprios. Em certas frequências, as ondas sonoras chegam em fase a qualquer ponto devido aos percursos de propagação coincidentes das ondas, que se repetem no tempo. Desta forma, os modos próprios estão associados à sobreposição de ondas sonoras, que usando o mesmo percurso mas direções opostas produzem ondas estacionárias com nodos e ventres [2]. Assim, há ressonância e existirão zonas da sala com pequenas atenuações e amplificações. Este efeito é tanto mais evidente quanto a sala tenha dimensões próxima da cúbica e com pouca ou nenhuma absorção.

#### 2.3.5. MATERIAIS E SISTEMAS DE ABSORÇÃO

##### 2.3.5.1 Introdução

Os materiais e sistemas de absorção podem ser divididos em três grupos distintos, nomeadamente:

- Porosos e fibrosos;
- Ressonadores (de Helmholtz);
- Membranas.

Estes materiais atuam melhor respetivamente na gama das frequências altas, médias e baixas (Figura 2.6). No entanto, um sistema de absorção acústico pode ser constituído pela composição destes elementos.

##### 2.3.5.2 Materiais Porosos

O mecanismo de absorção dos materiais porosos baseia-se na existência de poros e interstícios. Quando as ondas sonoras incidem nestes materiais fibrosos, transferem parte da sua energia no

movimento das fibras que resistem por fricção entre elas, e para o ar das cavidades internas por onde se propaga devido ao atrito do ar (viscosidade).

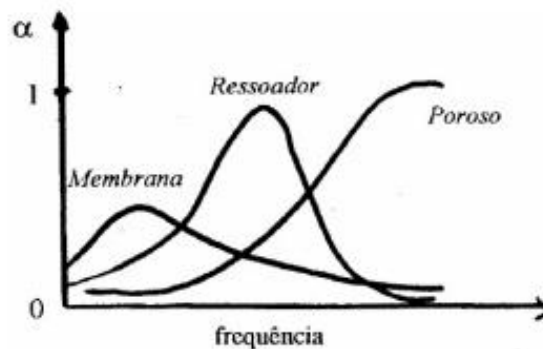


Figura 2.6 – Comportamento em frequência dos três tipos de materiais e sistemas absorventes [2]

O movimento do ar, devido às variações de pressão, transmite-se nestes pequenos espaços onde intervém a viscosidade do mesmo, amortecendo os movimentos provocados e assim introduzindo uma atenuação e respetiva absorção [13]. Por isso a energia sonora é transformada em calor. Quando as fibras estão muito soltas e afastadas há pouca energia perdida em calor. Caso estas se encontrem muito concentradas, não haverá muita penetração no material e o movimento do ar não causa pressão suficiente para ser eficaz. Entre estes dois extremos encontram-se os bons materiais absorventes sonoros [2,7]. Estes materiais são mais eficazes na absorção das altas frequências, e portanto curto comprimentos de onda. Quando se aumenta a espessura, melhora-se o comportamento nas baixas frequências.

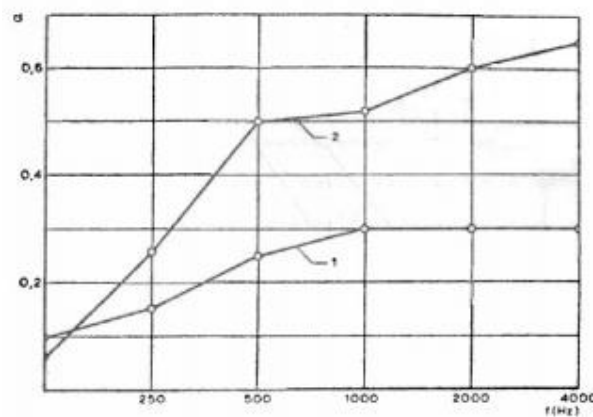


Figura 2.7 - Características da absorção sonora de alcatifas sobre feltro, aumentando a espessura de 1 para 2: 1 – Delgada (tipo lisa); 2 – Espessa (tipo veludo) [13]

Os reposteiros, alcatifas, massas porosas com fibras minerais, placas de fibra de madeira, aglomerados negros de cortiça, mantas de fibras de minerais (lã de rocha, lã de vidro), são alguns exemplos de materiais porosos mais utilizados na absorção essencialmente das altas frequências.

### 2.3.5.3 Ressonadores de Helmholtz

Um ressonador de Helmholtz é amplamente utilizado para atingir adequada absorção nas médias frequências e pode aparecer sob diversas formas. É um sistema formado por uma cavidade de paredes rígidas, tendo uma única abertura estreita. O ar no gargalo é colocado em vibração, movendo-se nele, de modo idêntico ao que acontece num sistema mecânico massa/mola (Figura 2.8 e Figura 2.9). A massa em movimento é a do ar contido no gargalo e a mola é o ar existente no volume interior [2,6]. Alterar o volume da cavidade de ar, ou o comprimento ou diâmetro do gargalo, é mudar a frequência de ressonância.

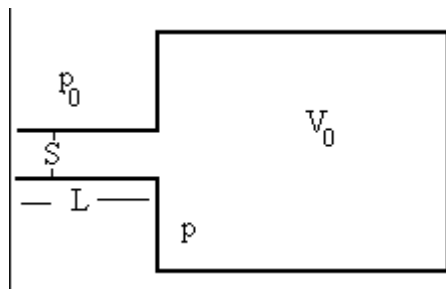


Figura 2.8 - Ressonador de Helmholtz

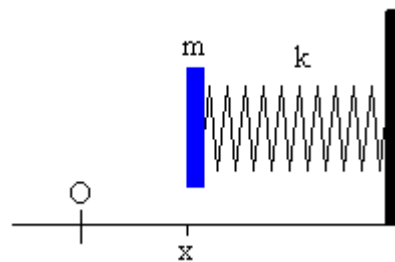


Figura 2.9 - Ressonador modelado por um sistema massa/mola

A forma mais vulgar de um ressonador de Helmholtz é uma garrafa vazia. A sua frequência de ressonância é dada pela expressão (2.16) e depende do volume da cavidade e das outras dimensões geométricas.

$$f_{ress} = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{(l + 1,6 \cdot r) \cdot V}} \quad (2.16)$$

onde,  $c$  – velocidade de propagação das ondas ( $\approx 343$  m/s);

$S$  – área do gargalo ( $\pi \cdot r^2$ ) ( $m^2$ );

$V$  – volume da cavidade ( $m^3$ );

$l$  – comprimento do gargalo (m);

$r$  – raio do gargalo (m).

É um sistema muito seletivo (em frequência) e a zona de eficácia pode ser alargada através da inclusão de material absorvente na caixa-de-ar, embora se perca em amplitude de absorção.

Dentro da categoria dos ressonadores de Helmholtz estão os ressonadores agrupados, vulgarmente designados de painéis perfurados. Cada um dos furos funciona como um gargalo e os volumes ressonantes funcionam como se tratassem de uma série de ressonadores individuais [7]. O aumento desta taxa de furação faz aumentar a eficácia, contudo tal aumento atinge o seu limite a cerca de 25% de perfuração (Figura 2.11). A partir deste valor o painel passa a ser controlado pelo efeito de porosidade do material absorvente [2]. Para estes painéis funcionarem devem estar afastados de uma superfície sólida e imóvel. A frequência de ressonância é assim dada por (2.17):

$$f_{ress} = \frac{10 \cdot c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6 \cdot r) \cdot d}} \quad (2.17)$$

onde, P – percentagem de perfuração (%);

e – espessura da placa perfurada (cm);

r – raio de cada perfuração (cm);

d – largura da caixa-de-ar (cm).

Ainda nesta mesma categoria inserem-se os painéis com ranhuras (Figura 2.12), idênticos aos perfurados e cuja frequência de ressonância pode ser dada por (2.18):

$$f_{ress} = 54,8 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot r}{e \cdot d(w + 2 \cdot r)}} \quad (2.18)$$

onde: r – espaçamento entre as ripas de madeira (cm);

e – espessuras das ripas de madeira (cm);

d – largura da caixa-de-ar incluindo material absorvente (cm);

w – largura das ripas de madeira (cm).

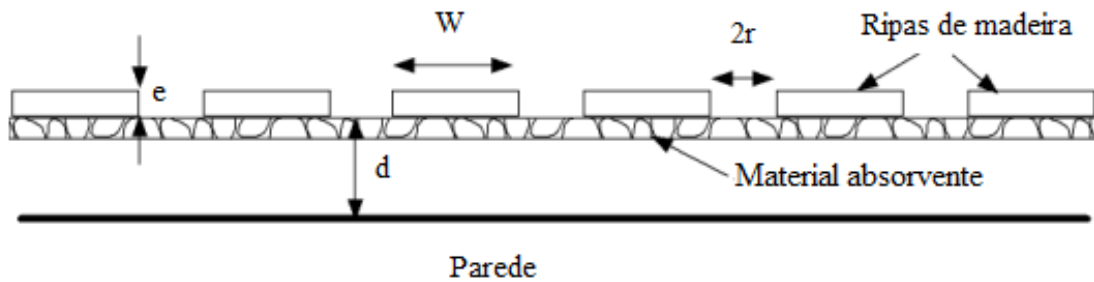


Figura 2.10 - Esquema de painéis com ranhuras [Adaptado de 7]

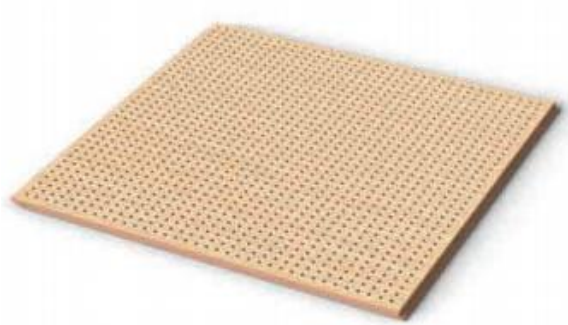


Figura 2.11 - Painel perfurado CF6 [14]



Figura 2.12 - Painel ranhurado CFRF 3/8 [14]

#### 2.3.5.4 Membranas

As membranas ou painéis ressonantes são muito eficazes e aconselháveis para atenuação nas baixas frequências, quando a distância ao elemento rígido a que deveriam ser colocados os sistemas porosos começa a ser demasiado elevada. Estes sistemas absorvem as ondas sonoras pela vibração de toda a sua estrutura, constituída por grandes painéis de pequena espessura e através de perdas de calor por fricção nas suas fibras quando o material entra em flexão [2,7].

A frequência para a qual a absorção sonora é máxima para estes materiais, é a frequência de ressonância e é calculável a partir da expressão (2.19):

$$f_{ress} = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (2.19)$$

onde,  $m$  – massa superficial do painel ( $\text{kg/m}^2$ );

$d$  – espessura da caixa-de-ar (m).



Figura 2.13 - Funcionamento de um painel ressonante [7]

Estes painéis membrana estão normalmente associados à absorção das baixas frequências, particularmente por mecanismos de ressonância, funcionando muitas vezes em conjunto com materiais absorventes de altas frequências (materiais porosos).

## 2.4. SALAS ACUSTICAMENTE PEQUENAS

### 2.4.1. INTRODUÇÃO

A grande dificuldade no tratamento acústico de salas pequenas insere-se no âmbito das emissões de baixas frequências. O facto do comprimento de onda de tais frequências ser da ordem de grandeza da

própria sala, resulta em sucessivas reflexões ficando assim estes espaços dominados por ondas estacionárias nestas frequências. Nestes casos, devido à criação de modos próprios, há ressonância e passam a existir zonas da sala com pequenas amplificações e atenuações face à média [6]. O som não é assim uniforme em diferentes pontos da sala.

Os problemas tornam-se inevitáveis se o som é gravado ou reproduzido em espaços muito pequenos. As salas com um volume inferior a aproximadamente 50 m<sup>3</sup> (por exemplo, salas menores que 4×4×3 m<sup>3</sup>) estão propensas à produção de frequências modais, com espaçamentos exagerados, que são a fonte de distorções audíveis [6]. Quando existe um altifalante localizado muito próximo de uma parede, por exemplo, a sua resposta em frequência fica muito distorcida. A reflexão próxima leva de volta a onda de pressão sobre o altifalante. As reflexões nas paredes, piso e cantos produzem vários sinais de aproximadamente 20 ms de atraso que se misturam com o sinal direto, distorcendo o som e a frequência principal [6].

As salas acusticamente pequenas apresentam uma audição crítica, não só devido às suas respostas em frequência, mas também aos seus modos próprios.

#### 2.4.2. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

A resposta em frequência de uma sala é a análise do seu comportamento relativamente ao ganho acústico numa certa gama de frequências. Uma sala com resposta em frequência ideal é uma sala onde é possível ouvir todas as frequências com a mesma intensidade com que são emitidas, isto é, a resposta em frequência deve ser uniforme e não distorcida pela sala.

A gama de frequências que mais dificuldade apresenta no seu tratamento, é a gama das baixas frequências, que pode apresentar picos de ganho dos 20 aos 200 Hz [15]. Essa gama é a mais problemática para salas de audição críticas.

Desta forma, de modo a garantir uma audibilidade adequada, é necessária uma resposta em frequência o mais próxima quanto possível da ideal. Os fatores que impedem uma resposta em frequência ideal são os modos acústicos, evidenciados na curva de resposta em frequência de uma sala.

A Figura 2.14 e a Figura 2.15, evidenciam as diferenças obtidas na curva de resposta de frequência de uma frequência dita ideal e uma frequência que apresenta picos de ganho na gama de frequências 20 aos 200 Hz.

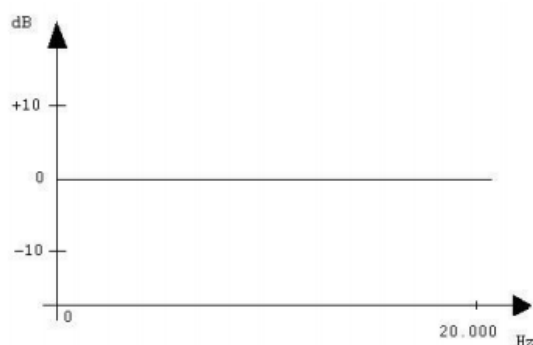


Figura 2.14 - Resposta em frequência idealizada [15]

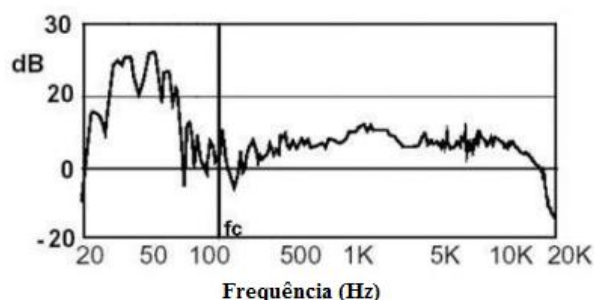


Figura 2.15 - Sala com resposta em frequência problemática, com muitos modos acústicos proeminentes nas baixas frequências [Adaptado de 15]



Uma sala acusticamente grande, como por exemplo salas de concerto, grandes estúdios e catedrais, apresenta uma frequência crítica abaixo do som mais grave gerado e o campo reverberante (difuso) domina as propriedades da sala – a pressão sonora média no tempo é igual em toda a sala e a energia sonora é igualmente provável em todas as direções. As salas acusticamente pequenas, como por exemplo uma sala de música, estúdios de gravação, *home-cinemas*, revelam uma frequência crítica dentro da gama de frequências geradas e as ondas estacionárias (modos acústicos) dominam a resposta. É então de grande importância conhecer como se comportam esses espaços. Uma sala pode ser “pequena”, sob o ponto de vista do comportamento modal, até uma certa frequência, e “grande” a partir desse mesmo valor, sob o ponto de vista da densidade média e tempo de reverberação.

#### 2.4.3. MODOS ACÚSTICOS

Todas as salas possuem frequências de ressonância ditadas pelas suas dimensões e geometria. Estes modos são mais notáveis nos extremos graves. Quando o ajuste das dimensões não é possível, algumas frequências isoladas são mais acentuadas – “falam mais alto” precisando de ser fortemente atenuadas com absorvedores sintonizados.

Quando se tem uma fonte sonora a emitir som na frequência  $f_0$ , surge uma ressonância na frequência tal que:

$$f_0 = \frac{c}{2 \cdot D} \quad (2.20)$$

onde,  $c$  – velocidade do som ( $\approx 340$  m/s);

$D$  – distância entre duas paredes paralelas da sala.

Ressonâncias similares ocorrem nas frequências  $2f_0$ ,  $3f_0$ ,  $4f_0$ , etc. A frequência fundamental  $f_0$  é a frequência fundamental entre duas paredes paralelas e é acompanhada de uma série de modos com ressonâncias em frequências crescentes a partir de  $f_0$  [15]. Porém, apenas a ressonância entre duas paredes paralelas está considerada, isto é, apenas os modos axiais entre duas paredes são tidas em conta. Cada modo axial envolve apenas duas paredes opostas paralelas. Modos tangenciais envolvem quatro paredes, por sua vez, modos oblíquos envolvem as seis paredes da sala. A Figura 2.16 ilustra esses modos, usando o conceito de “raios acústicos”.

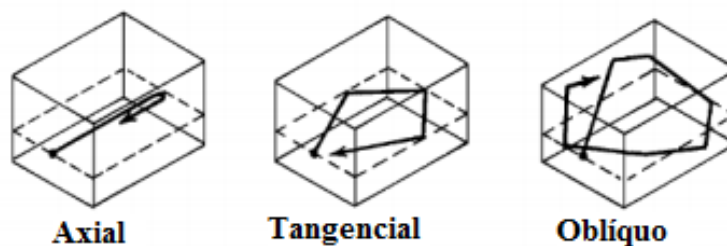


Figura 2.16 - Visualização dos modos usando conceito de "raios acústicos" [Adaptado de 15]

Os modos acústicos proeminentes não favorecem a qualidade acústica de um ambiente. Sempre que uma frequência emitida é igual à frequência de um modo, passa a haver um aumento da intensidade sonora nessa frequência. Logo, a resposta em frequência do ambiente não é linear para todas as frequências, como seria o caso ideal.

O cálculo dos modos axiais, tangenciais e oblíquos em salas de forma cúbica é dado pela expressão (2.21).

$$f = \frac{c}{2} \times \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2} \quad (2.21)$$

onde,  $f$  – frequência do modo  $p$ ,  $q$  e  $r$  (Hz);

$c$  – velocidade do som ( $\approx 340$  m/s);

$p$ ,  $q$ ,  $r$  – números naturais: 0, 1, 2, 3, ...;

$L$ ,  $W$ ,  $H$  – dimensões da sala (m), conforme a Figura 2.17.

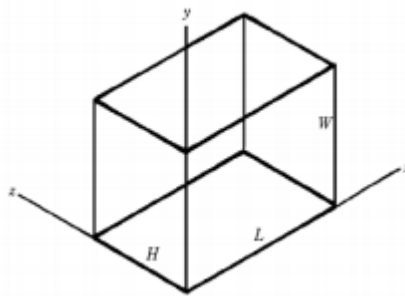


Figura 2.17 - Representação de uma sala com as dimensões  $L$ ,  $W$  e  $H$  [15]

Os primeiros modos axiais, por exemplo, obtêm-se a partir da expressão (2.19) para  $p=1$ ,  $q=0$  e  $r=0$ . A condição que cria as ondas estacionárias é o facto dos modos acústicos serem apenas possíveis quando  $p$ ,  $q$  e  $r$  pertencem à classe de números naturais [15]. Os modos axiais são obtidos com dois elementos ( $p$ ,  $q$  ou  $r$ ) iguais a zero, os modos tangenciais com qualquer elemento do trio igual a zero, por sua vez os modos oblíquos são obtidos com todos os elementos do trio diferentes de zero.

É portanto de esperar que os modos axiais sejam os mais fortes, visto que os modos tangenciais e oblíquos envolvem reflexões em mais superfícies, isto é, esses modos sofrem mais absorção comparativamente aos modos axiais. O tempo de queda dos modos está relacionado com o tempo de reverberação, desta forma, sabendo-se a frequência do modo, é possível calcular o tempo de reverberação e a largura de banda de modo através da seguinte expressão [6,15]:

$$Bandwith = f_2 - f_1 = \frac{2,2}{TR} \quad (2.22)$$

onde,  $TR$  – tempo de reverberação (s).

A Figura 2.18 apresenta graficamente a largura de banda de um modo acústico.

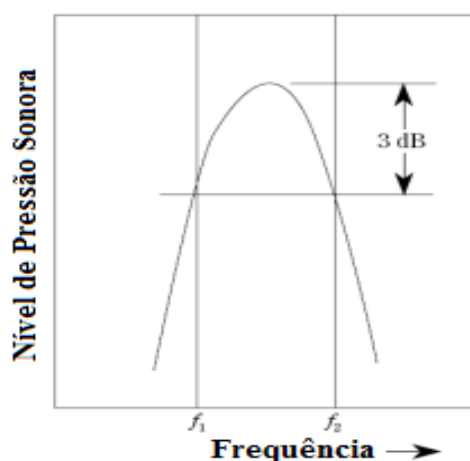


Figura 2.18 - Largura de banda de um modo acústico [Adaptado de 15]

#### 2.4.4. DIAGRAMA DE BOLT

Vários autores oferecem sugestões acerca das dimensões mais adequadas de salas de audição e estúdios. Estas sugestões baseiam-se nas dimensões geométricas das salas. Bolt, por sua vez, sugere relações preferenciais entre as dimensões de uma sala retangular através do “diagrama de Bolt”.

As recomendações mostradas no diagrama de Bolt estabelecem assim as dimensões ideais (altura, comprimento e largura) para que as salas de audição e estúdios tenham uma resposta suave em baixa frequência.

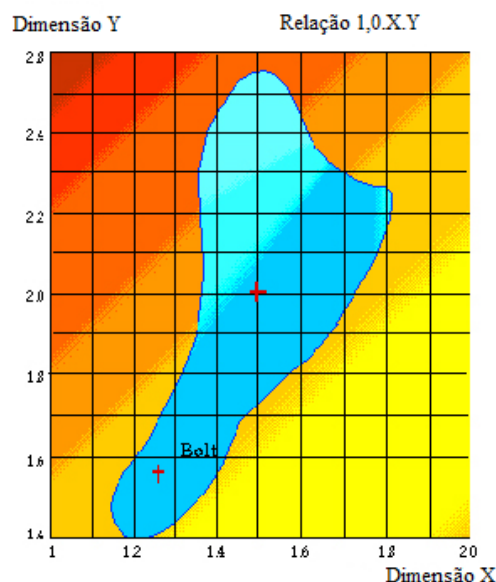


Figura 2.19 - Diagrama de Bolt [Adaptado de 16]

Ao observar o diagrama da Figura 2.19, constata-se que a zona ideal à geometria e dimensão de uma sala se encontra na zona demarcada a azul. A zona fora da área delimitada a azul apresenta um déficit na resposta uniforme em frequência.



## 3

## ABSORVEDORES ACÚSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

### 3.1. SISTEMAS DE ABSORÇÃO SONORA PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

De forma a obter uma melhoria na qualidade sonora do ambiente, devem ser tratados os modos acústicos de baixa frequência. Este tratamento consiste em minimizar os modos acústicos mais fortes e assim obter uma resposta em frequência mais uniforme em toda a sala.

Uma vez que o comprimento de onda nestas frequências é muito grande, não é qualquer material ou sistema que as absorve. O desafio consiste em desenvolver um tipo de material ou sistema que seja absorvedor de tais frequências (50 aos 250 Hz).

Existem vários tipos e formas de absorvedores de baixas frequências. Estes absorvedores são vulgarmente designados no mercado como *bass-traps*, *bass-corners* ou *tube-traps*. A Figura 3.1 exemplifica quatro possibilidades para assegurar a absorção das baixas frequências numa sala pequena.

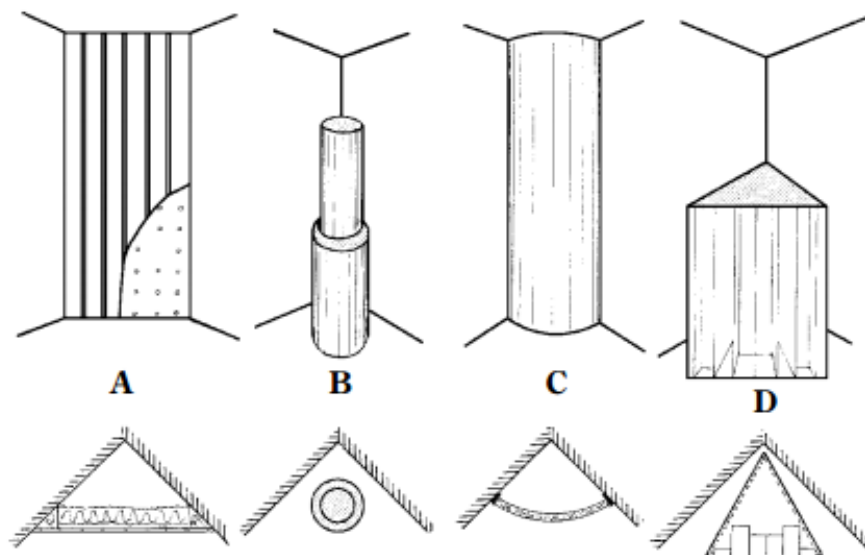


Figura 3.1 - Quatro formas possíveis de absorção de baixa frequência para os cantos de uma sala: (A) ressonador de Helmholtz; (B) *tube-trap*; (C) *snap-trap*; (D) *corner killers* [6]

A Figura 3.1 - A é um ressonador de *Helmholtz* construído no canto da sala. Este pode ser constituído por painéis perfurados ou ripas espaçadas. Normalmente é deixada uma profundidade média triangular

ou um espaço de ar na parte de trás do ressoador de forma a assegurar uma maior absorção na gama das baixas frequências. O facto de se optar por painéis ranhurados, ou seja, por ripas de madeira devidamente espaçadas, é que estas, quanto maior for o seu estreitamento e quanto mais profundas forem as suas ranhuras, mais baixa é a frequência de máxima absorção. No entanto, o problema ao optar por este tipo de dispositivo é relativo à escolha de um painel perfurado com a correta área aberta de acordo com a funcionalidade da sala, caso contrário este tipo de absorvedor funciona apenas na absorção das frequências médias a altas.

As *tube-traps* (Figura 3.1- B) são absorvedores cilíndricos disponíveis em vários tamanhos em que quanto maior o diâmetro, mais eficaz é a absorver as baixas frequências. O menor tamanho, 23 cm de diâmetro, absorve frequências graves até 90 Hz. O modelo de 33 cm absorve até 70 Hz. Os maiores modelos de 41 e 51 cm absorvem até aos 55 e 30 Hz, respetivamente [6]. Usualmente, a altura padrão de um *tube-trap* é de aproximadamente 1,50 m, no entanto podem ser personalizadas e até ser alteradas *in situ*. Estes sistemas de absorção de baixas frequências facilmente se empilham. São cilindros fibrosos constituídos por uma estrutura de arame que, atuando em conjunto funcionam como cavidades de ressonância [6]. As baixas frequências são facilmente absorvidas (abaixo dos 400 Hz) penetrando na membrana superficial, por sua vez, as altas frequências são refletidas a partir desta e pela zona refletora existente no próprio *tube-trap*.

O tratamento de canto representado na Figura 3.1- C é constituído por uma membrana acústica em forma de meia-lua. Esta membrana curva fornece um ângulo de reflexão acima dos 500 Hz [6]. Por sua vez, o espaço de ar atrás do painel acústico garante uma absorção nas baixas frequências. Uma das suas melhores características é a sua portabilidade que pode ser facilmente configurada de acordo com as exigências.

Um outro tratamento de canto possível é o exemplificado na Figura 3.1- D. Este dispositivo é denominado de *Triffusor* e está especialmente adaptado para o controlo acústico variável, com um lado absorvente, um lado de difusão e uma outra face refletora. O *Korner Killer* é uma adaptação do *Triffusor* com as faces de absorção na direção dos cantos e o lado difusivo na direção da sala. Este lado, não só difunde a energia sonora que sobre ele incide, mas também reduz a amplitude da energia que voltou para a sala [6].

Com um par de qualquer um dos dispositivos representados na Figura 3.1 têm-se como efeito um benéfico controlo modal. Caso seja necessário acentuar este efeito, é adicionado mais um par de dispositivos de forma a melhorar os problemas resultantes da ressonância da sala.

O facto de estarem localizados no canto das salas deve-se à máxima pressão concentrada nesta zona da sala e devido ao facto de qualquer onda sonora, ao atingir um canto, ser redirecionada para a fonte, independentemente do ângulo de incidência – “efeito de canto”. Na grande maioria dos casos, os absorvedores porosos são colocados nessa posição da sala, uma vez que os modos têm uma máxima pressão nos cantos e a velocidade das partículas é muito baixa, logo a absorção é bastante eficaz. A absorção pode ainda ser ampliada ainda através da introdução de um amortecimento adicional na caixa-de-ar, no entanto este procedimento reduz a eficiência de absorção máxima. Uma solução alternativa é a utilização de uma série de módulos, cada um deles ajustado de forma a trabalhar de um modo diferente uma banda de terço de oitava para a absorção de banda larga mais geral. Mas uma quantidade considerável do limite de espaço deve ser coberta com absorvedor sonoro, de forma a obter absorção de maior gama de baixas frequências [17].

Os *bass-traps* descritos são então considerados uma das soluções mais eficazes para suavizar os efeitos dos modos acústicos de baixa frequência, cuja existência é frequentemente associada ao *boom*

presente nas salas. Estes sistemas, têm como objetivo uma melhoria na resposta destas frequências. Pretende-se ainda que sejam de fácil instalação.

Apresentam-se de seguida, alguns exemplos de *bass-traps* existentes no mercado.

*Havsvåg BT*, *Kubus* e *Basskutt* (Figura 3.2 (A), (B) e (D), respetivamente (da *Skum Acoustics*) [17]) são dispositivos especialmente selecionados para os cantos das salas. Pretende-se com estes equipamentos, um maior alcance na precisão na acústica das baixas frequências colocando-os nos cantos mais próximos do ponto de audição. O dispositivo relativo à Figura 3.2 (C) apresenta um *design* mais versátil, com três posições de montagem, duas planas e uma angular (Figura 3.3). A sua posição angular permite assim uma formação de uma caixa-de-ar na retaguarda do painel, favorecendo assim a absorção em baixas frequências. Pode ainda ser usado como painel absorvente de forma a controlar a redução de reflexões nas médias e altas frequências. Todos estes materiais são constituídos por uma espuma acústica (*ZH FR25*).

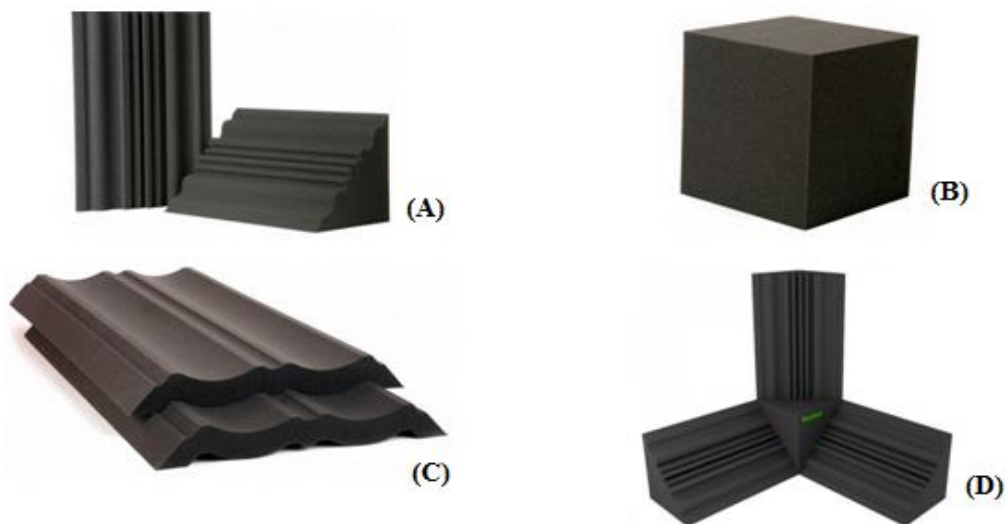


Figura 3.2 - Bass-traps: (A) Havsvåg BT; (B) Kubus; (C) Kotka; (D) Basskutt [18]



Figura 3.3 - Possibilidades de montagem - painel *kotka* [18]

Todos os sistemas de absorção de baixas frequências apresentadas na Figura 3.4 podem ser aplicados nos cantos como nas paredes da sala. São sistemas constituídos por madeira e espumas de alta densidade de modo a tentar responder aos problemas acústicos nas baixas frequências. A Figura 3.4 (B) é um exemplo de um dispositivo cujo objetivo é o controlo da ressonância do ar numa cavidade sendo automaticamente ajustável consoante a solução adotada para determinado espaço. Por sua vez, o *wave wood bass-trap* (Figura 3.4 (C)), pode ser aplicado nos cantos ou tetos, dando assim origem a

uma caixa-de-ar na sua retaguarda, cuja finalidade é um melhoramento do comportamento da sala nas frequências mais baixas, absorvendo-as. O seu esquema de montagem poderá ser o apresentado na Figura 3.5.

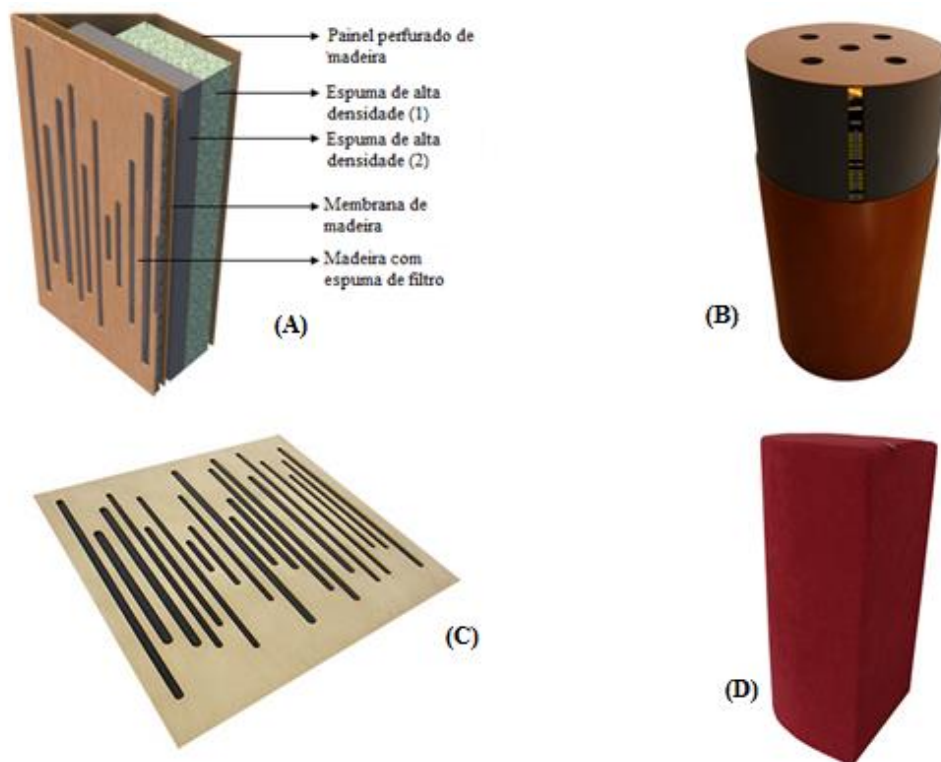


Figura 3.4 - Bass-traps: (A) *Super bass extreme*; (B) *Vari bass*; (C) *Wave wood bass-trap*; (D) *Super bass 90 premium* [Adaptado de 19]

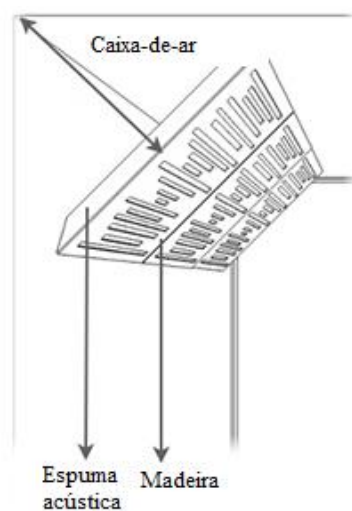


Figura 3.5 - Esquema de montagem do *wave wood bass-trap* [Adaptado de 19]



A Figura 3.6 exemplifica mais alguns tipos de *bass-traps* (*real traps*). Todos eles apresentam um *design* mais versátil podendo ser aplicados nos cantos e paredes das salas. Os *mega-traps* (Figura 3.6 (A)) são apenas indicados para os cantos. Apresentam apenas uma face frontal e quando empilhadas do piso ao teto, funcionam para absorção máxima. São constituídas por membranas de madeira e tecido na sua zona frontal para uma absorção máxima em frequências graves ou fibra de vidro por exemplo, que apresenta muitas vezes um desempenho modal melhor que as espumas acústicas. A profundidade triangular do dispositivo permite também uma maior absorção em tais frequências [20].

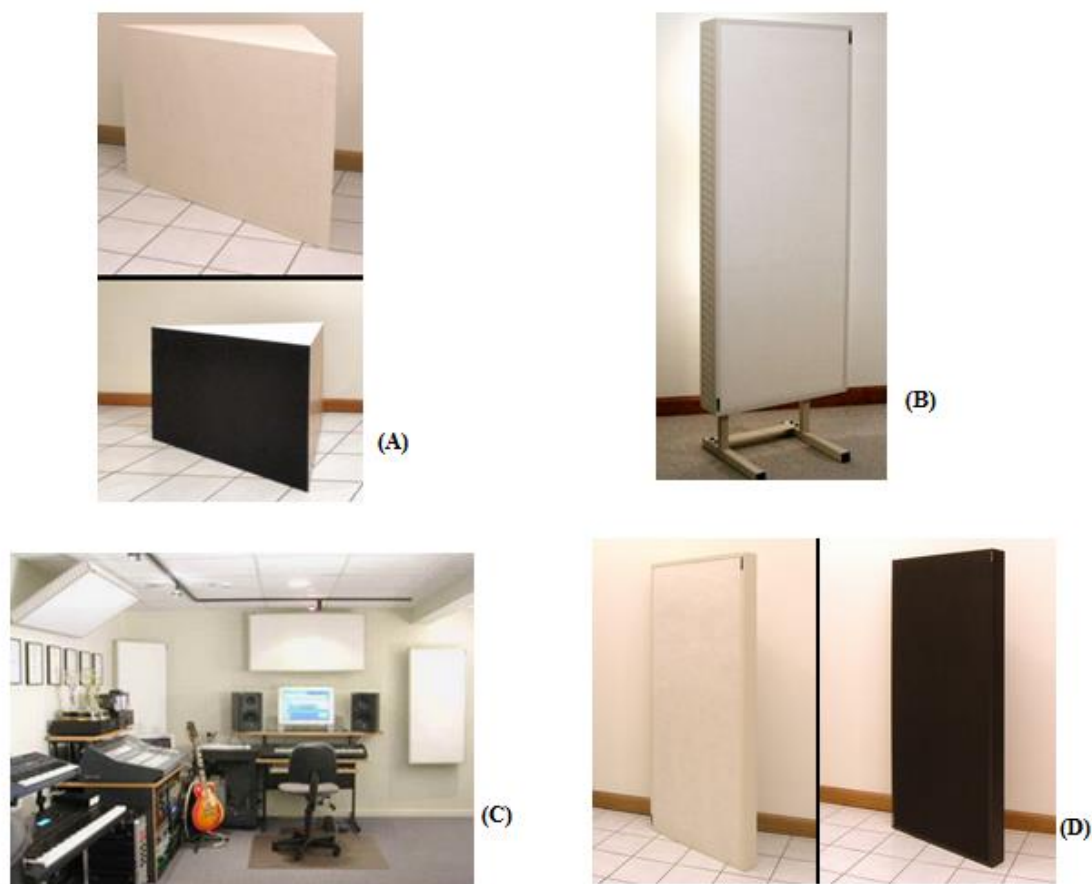


Figura 3.6 - Bass-traps: (A) *Mega-traps*; (B) *Mondo traps/Corner mondo traps*; (C) *Mini traps*; (D) *Bare traps* [20]

A Figura 3.7 apresenta alguns exemplos de *tube-traps* e seu correto posicionamento numa sala pequena. Os *tube-traps* são cilindros porosos cobertos com tecido (composto de fibra de vidro de 25 mm de espessura comprimida) que, quando selado, age como um dispositivo de zona de pressão. São projetados com o objetivo de aproveitar ao máximo as zonas de máxima pressão acústica criada nos cantos de uma sala. Num esforço para eliminar o diferencial existente entre o exterior e o interior do tubo oco, a onda sonora responsável pela zona de pressão tenta pressurizar o núcleo oco do tubo. Com o fim de o fazer, atravessa através de fibra de vidro de resistência do tubo, a qual, por sua vez, dissipa a energia da onda em calor.

O resultado que se deseja alcançar com este sistema de absorção sonora de baixas frequências é a conversão das mudanças de pressão do ar em movimento dentro das paredes dos *tube-traps*. Pretende-

se assim, através da fricção regulada nas paredes deste dispositivo, que a energia seja amortecida. Os *tube-traps* são projetados de modo a funcionar melhor nas áreas onde os modos próprios de baixas frequências são mais notórios, isto é, nos cantos das salas e juntos às fontes sonoras, daí um dos motivos da sua forma cilíndrica.

Usualmente os *tube-traps* estão localizados nos cantos das salas ou atrás ou ao lado dos altifalantes de forma a melhorar o desempenho acústico do espaço (Figura 3.7 (C) e (D)). Quando localizados em cada um desses pontos de reflexão reduzem a força de reflexão através da filtragem na gama das baixas frequências. São sistemas facilmente empilháveis quando se tem como propósito o aumento da sua eficiência. Quando estes dispositivos são colocados nos cantos atrás das principais fontes de produção de som tem como fim uma estabilização do acúmulo de reverberação na parte da frente da sala e adicionar um controle uniforme das frequências.

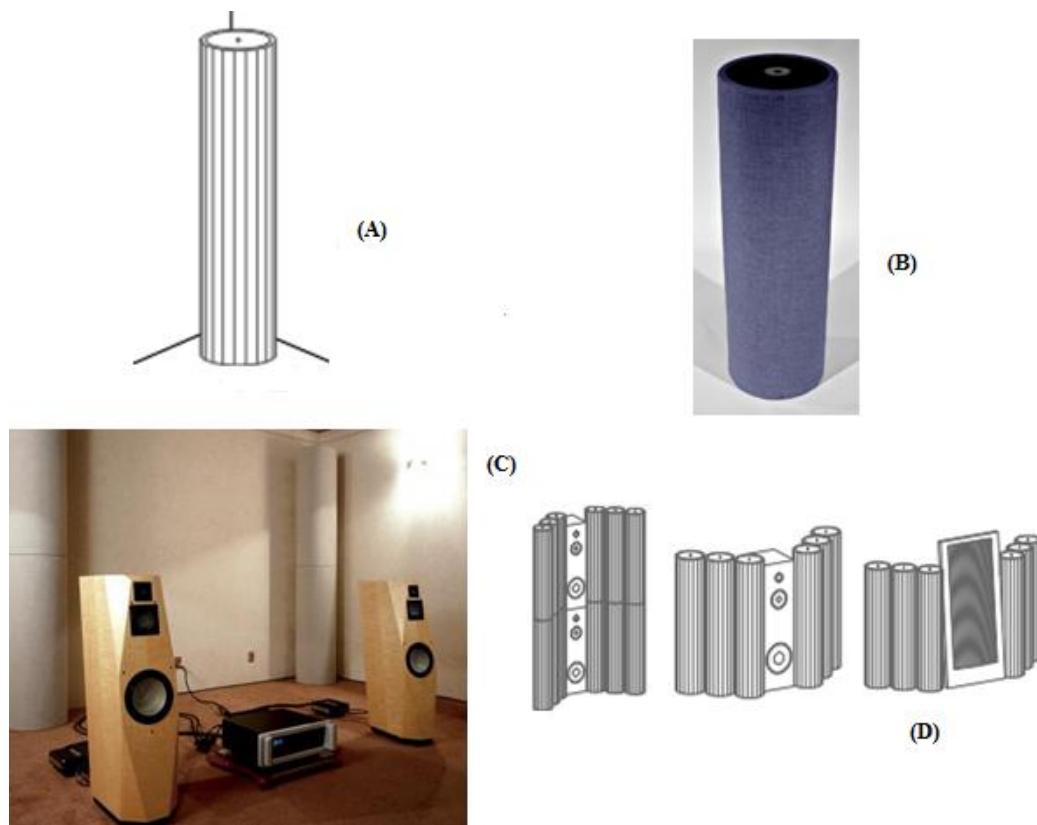


Figura 3.7 – *Tube-traps*: (A) e (B) e exemplos do seu posicionamento (C e D) [Adaptado de 21 e 22]

A física por trás de um *tube-trap* baseia-se num circuito capacitivo – resistivo (Figura 3.8). O condensador acústico (C) é a câmara-de-ar no interior. Quanto maior esta for, mais eficiente é o *tube-trap* nas baixas frequências. A resistência acústica (R) é a impedância de uma onda sonora. O painel difusor que cobre metade do *tube-trap* funciona como um bloqueador acústico (L), que reflete os sinais agudos.

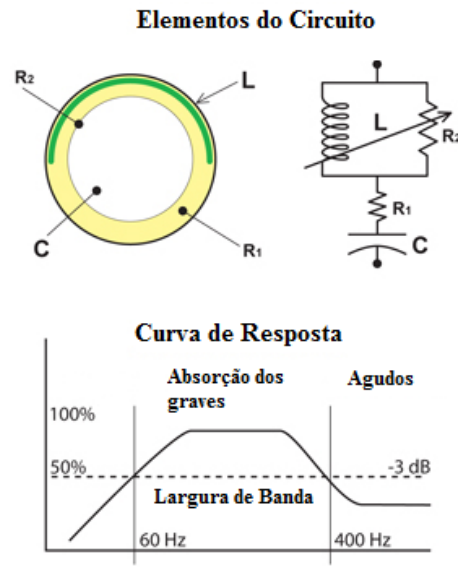


Figura 3.8 - Elementos do circuito e curva de resposta de um *tube-trap* [Adaptado de 22]

### 3.2. CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR NA CONCEÇÃO DE UM *BASS-TRAP*

Aquando da incidência de uma onda sonora na superfície de um material, parte da energia é absorvida e transformada em energia térmica. Em grande parte dos casos, a conversão em energia térmica resulta do atrito à passagem de ar. Parte da energia também pode ser absorvida através da vibração ou deformação de lâminas ou painéis, quando solicitados por ondas sonoras, como é o caso dos ressoadores [23].

No que se refere à espessura do material na sua globalidade, considera-se que na gama das baixas frequências, quanto maior for o acréscimo da espessura, isto é, dos componentes constituintes dos painéis, maior é a absorção nestas frequências (Figura 3.9). Por sua vez, no que diz respeito à massa volúmica, não existe uma clara relação entre ela e a absorção sonora. Massas volúmicas superiores não traduzem acréscimos de absorção sonora em termos globais, no entanto, nas zonas das baixas frequências a absorção sonora pode assumir valores mais elevados para soluções com massas volúmicas superiores. Na absorção de tais frequências é importante que a membrana ressonante apresente uma espessura reduzida, na ordem dos milímetros. Por sua vez, quanto maior for a espessura do elemento absorvedor utilizado, mais favorável é a absorção das baixas frequências.

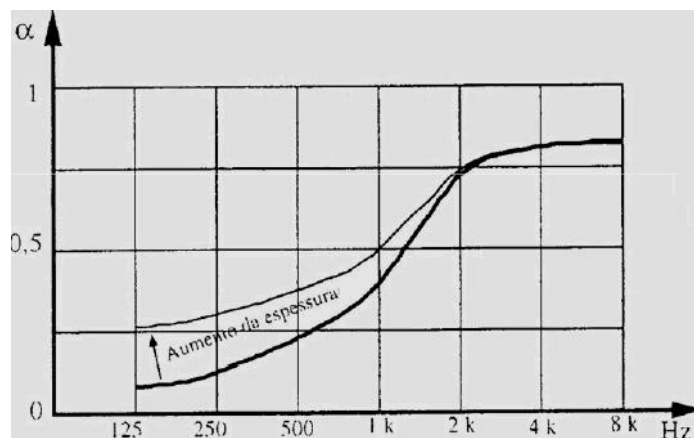


Figura 3.9- Coeficiente de absorção em materiais porosos ou fibrosos [24]

É ainda importante que o material seja estável do ponto de vista dimensional, isto é, que as suas dimensões não sofram alterações significativas com as variações de humidade e/ou temperatura. A estabilidade dimensional de um material absorvente depende dos elementos constituintes e do tipo de ligante [23]. É de referir que os materiais inorgânicos são mais estáveis comparativamente aos materiais constituídos por produtos orgânicos. Existem ainda materiais que se desintegram quando estão sujeitos, durante longos períodos de tempo, a teores de humidade muito elevados.

Um outro aspeto a ter em conta é o efeito da caixa-de-ar entre o material absorvente sonoro e o elemento rígido. Desta forma, o coeficiente de absorção sonora aumenta de uma forma muito acentuada nas baixas frequências.

Embora não haja uma relação entre o material absorvente sonoro e a sua reação ao fogo, a propagação do fogo nestes materiais deve ser relevante na escolha da solução mais adequada à situação em causa. No sistema europeu de classificação da reação ao fogo, são definidas sete classes: A1 (melhor), A2, B, C, D, E e F (pior). Esta classificação para todos os materiais de construção em geral é dada em função de um conjunto de parâmetros relevantes do desempenho dos produtos face a três níveis de solicitação térmica: pequena fonte de ignição; objetos isolados em combustão e fogo generalizado. A maioria das euroclasses mencionadas deverá ser complementada com uma classificação com caráter obrigatório que traduz a produção de fumo (s1, s2 e s3) e a libertação de gotas ou de partículas inflamadas (d0, d1 e d2). Materiais absorventes sonoros como lã-de-rocha e lã-de-vidro, constam numa lista de materiais e produtos aprovados pela Comissão Europeia, classificados na classe A1.

A acumulação de pó ou sujidade nos materiais absorventes sonoros é determinante na refletância luminosa das suas superfícies pelo que estas devem ser limpas ou pintadas de forma a conservar essas características [23]. No entanto é fundamental garantir que tais tratamentos não diminuam as capacidades de absorção sonora dos materiais. Caso não se tenham em conta tais preocupações, as capacidades de absorção sonora podem diminuir até cerca de 40%, principalmente nas altas e médias frequências. O efeito da pintura depende muito do tipo de superfície de cada material. Os materiais de superfície texturada merecem no entanto particular atenção caso tenham que ser objeto de nova pintura. A nova pintura não pode assim afetar a profundidade, o tamanho e a forma das fissuras destes materiais. É então aconselhável, sempre que necessário consultar o fabricante acerca do tipo de pintura mais adequada para o material em questão.

Para além das características acima mencionadas, que na sua maioria se relacionam com o desempenho dos materiais, em termos de absorção sonora há ainda que ter em conta aspetos que podem determinar a escolha de determinado tipo de solução em detrimento de outra [23]. Esses aspetos podem ser:

- Aspeto estético – *design* do painel e respetivas dimensões;
- Compatibilidade com outros componentes ou outros materiais;
- Rapidez e facilidade de instalação;
- Rapidez e facilidade de reparação caso necessária;
- Manutenção e facilidade de limpeza;
- Possibilidade de pintura;
- Espaço disponível para a sua aplicação;
- Suscetibilidade de degradação perante elevados teores de humidade;
- Peso;

- Versatilidade;
- Facilidade de manobra;
- Custo.

É imperativo ter em atenção que cada sala possui diferentes modos próprios e diferentes respostas em frequência. Isto significa que perante problemas na sua acústica, cada local carece de um tratamento específico e personalizado consoante as suas respostas em frequência.

Usualmente, o correto procedimento acústico é, em primeiro lugar, a medição da resposta da sala nas frequências em que mais se denotam os modos próprios. Após a análise desses resultados projeta-se o painel acústico que é sintonizado para uma determinada gama de frequências. O ensaio permite ainda dar uma ideia das dimensões dos painéis conforme as dimensões da sala e as suas falhas acústicas. Tipicamente, aquando da construção de um *bass-corner*, as dimensões usualmente utilizadas vão dos 70 aos 120 cm de largura e ocupam grande, parte das vezes, todo o pé direito da sala.

### 3.3. MATERIAIS CONSTITUINTES DE SISTEMAS ABSORVEDORES SONOROS

#### 3.3.1. ASPETOS CONSTRUTIVOS

Dependendo do tipo de utilização de uma sala, os aspetos construtivos de um material ou sistema absorvedor sonoro (*bass-trap* ou não) variam consoante os requisitos propostos. Sendo assim e consoante a gama de frequências em que se pretende trabalhar, podem-se destacar os sistemas construtivos presentes em esboço nas Figuras 3.10 a 3.15:

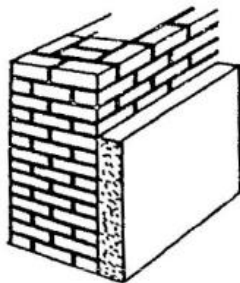


Figura 3.10 - Camada porosa sobre parede rígida [24]

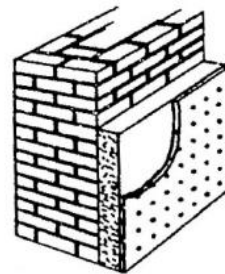


Figura 3.11 - Camada porosa com revestimento perfurado [24]

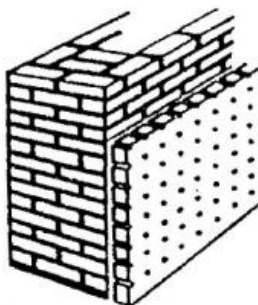


Figura 3.12 - Placas acústicas perfuradas [24]

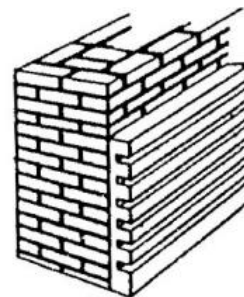


Figura 3.13 - Placas acústicas estriadas [24]

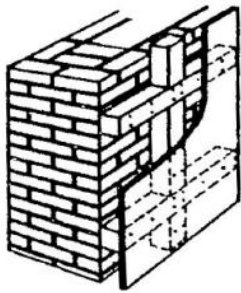


Figura 3.14 - Membrana vibrante sobre estrutura de madeira [24]

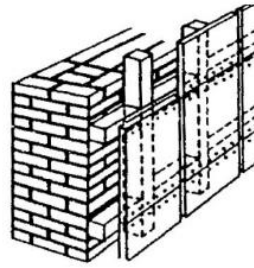


Figura 3.15 - Placas de ressonância com fendas [24]

### 3.3.2. MATERIAIS POROSOS ABSORVEDORES

Os materiais porosos ou fibrosos absorvedores usados (uns em maior escala que outros) no interior de absorvedores de baixas frequências podem-se distinguir entre os vários tipos abaixo descritos [24]:

- Tecidos: depende do peso específico com que cobrem a superfície do painel;
- Fibras minerais: lã de rocha e de vidro. Variam em função do efeito da espessura, densidade e largura;
- Materiais plásticos: poliuretano expandido, poliestireno expandido ou espumas flexíveis de poliuretano;
- Aglomerados de cortiça: aglomerado composto (espessura de 3 a 6 mm) ou aglomerado negro (espessura de 20 a 40 mm).



Figura 3.16- Lã de rocha e lã de vidro: dois dos principais materiais porosos absorvedores utilizados nos painéis absorvedores de baixas frequências [24]

# 4

## DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES DE PAINÉIS ACÚSTICOS PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Após a análise tratada nos capítulos anteriores, torna-se perceptível a influência das características geométricas de um painel absorvedor de baixas frequências. Estas são determinadas pelo uso de membrana ressonante (ou painel perfurado) na superfície do sistema, pelo número de caixas-de-ar e suas profundidades, pelo diâmetro e percentagem de furação dos painéis perfurados, funcionando assim como ressoadores agrupados e, por último, mas não menos importante, pelo material absorvedor poroso utilizado (massa volúmica e espessura).

No presente capítulo aborda-se o estudo relativo à modelação dos painéis acústicos em baixas frequências. Com recurso a um programa acústico – *acoustic modelling* [25] - especializado em painéis absorvedores acústicos, avalia-se o comportamento dos painéis idealizados consoante a variação dos parâmetros estudados, sendo possível fazer uma análise da sua influência na capacidade de absorção dos sistemas absorvedores de baixas frequências.

Por fim, enumeram-se todos os parâmetros atribuídos na modelação do sistema e as opções que permitiram melhorar o seu comportamento, tanto no que diz respeito às opções do programa utilizado como no que concerne às características do próprio painel. Referem-se ainda os valores otimizados dos parâmetros em que o painel apresentava maior sensibilidade acústica nas baixas frequências.

### 4.2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO

Nos casos em que se opta por um sistema de absorção tipo membrana, esta vibra numa faixa seletiva de baixas frequências, determinada pela sua massa e rigidez da mola de ar, introduzindo o ar através de uma camada porosa interna assim produzindo a absorção de baixa frequência.

A Figura 4.1 a) ilustra o coeficiente de absorção sonora típico desse tipo de dispositivo, e a Figura 4.1 b) expõe um exemplo de aplicação em que o material absorvedor é colocado no canto, onde a pressão sonora é máxima para todos os modos da sala. Se o material absorvedor tem um pico de ressonância com pouca distribuição nas frequências vizinhas e cria um pico ou vale acentuado na resposta em frequência, existe o risco de criação de um “entalhe” na frequência errada. Isto provoca o agravamento dos problemas modais, ao invés de os amenizar [16]. Por conseguinte, é necessária a verificação



experimental da absorção. Na medição de baixas frequências, os resultados apresentados na Figura 4.1 a) foram obtidos através de um tubo de impedância invulgarmente grande.

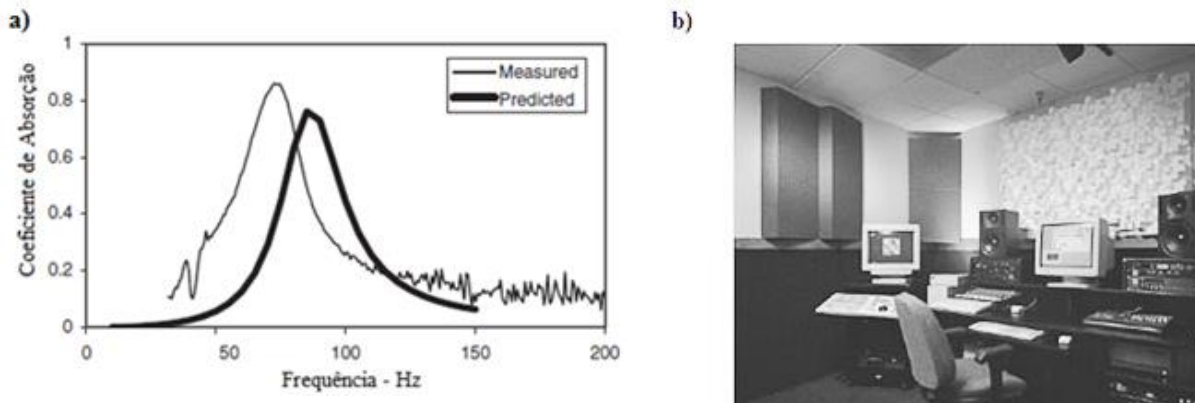


Figura 4.1- a) Coeficiente de absorção para incidência normal medido e previsto para um absorvedor de membrana; b) instalação típica de um amortecedor de canto numa sala de reprodução pequena. [Adaptado de 16]

A colocação de material absorvente no interior do sistema aumenta a eficácia de absorção nas mais baixas frequências. Na Figura 4.2 apresentam-se os resultados de três exemplos de membranas de contraplacado.

A absorção de um sistema tipo membrana pode ainda ser alargada, na sua gama de frequências, através da introdução de um amortecimento adicional na caixa-de-ar. Contudo este procedimento tende a reduzir a eficiência de absorção máxima [16]. Uma solução alternativa poderá ser a utilização de uma série de módulos, de forma a ajustar cada um deles numa banda de um terço de oitava diferente, para a absorção de uma banda geral mais larga. Convém ainda ter em atenção que uma quantidade considerável do limite de espaço deve ser composta com material absorvedor, de modo a obter uma ampla banda de absorção de baixa frequência.

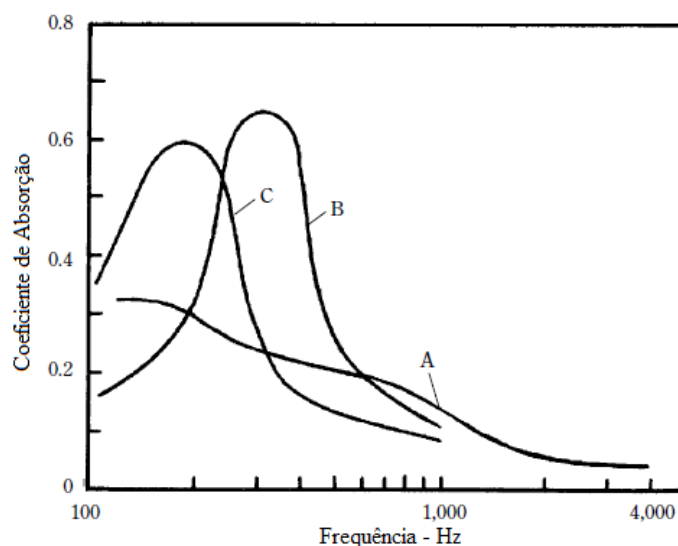


Figura 4.2 - Coeficiente de absorção sonora de três painéis absorvedores tipo membrana: (A) 5 mm de contraplacado com 50 mm de caixa-de-ar; (B) 2 mm de contraplacado com "lã mineral" de 25 mm e caixa-de-ar de 6 mm; (C) igual a (B), mas para um painel de 3 mm de espessura. [Adaptado de 6]



Nos casos em que se opta por uma absorção de painéis perfurados de madeira, é possível igualmente a absorção de frequências específicas. As ranhuras dos painéis podem ser, essencialmente, um truque visual para esconder os orifícios nos casos em que eles não são visualmente desejáveis. Na base das ranhuras existe um furo de diâmetro único ou duplo, fornecendo um caminho de som através do painel. Fazendo-se variar o espaçamento da ranhura, a profundidade da caixa-de-ar traseira ou as características internas, é possível obter a absorção ao longo de uma ampla gama de frequências [16].

A Figura 4.3 expõe os coeficientes de absorção sonora típicos para diferentes profundidades da cavidade e diâmetro dos furos. Observa-se que à medida que o diâmetro dos orifícios aumenta, a área aberta também aumenta e por conseguinte existe uma maior absorção nas frequências mais elevadas, provocando ainda um ligeiro aumento da frequência de ressonância. O oposto acontece quando se diminui o diâmetro dos orifícios. A área aberta diminui e há uma maior absorção nas frequências mais baixas.

Este tipo de painéis absorvedores não são particularmente invulgares em termos de acústica. A física por trás dos mecanismos já é conhecida há mais de um século. O problema com este tipo de construção está na obtenção do elemento perfurado com o correto diâmetro do orifício e de área aberta. Usualmente, o painel perfurado tem de ser especificamente construído para fins acústicos, o que o torna mais dispendioso.

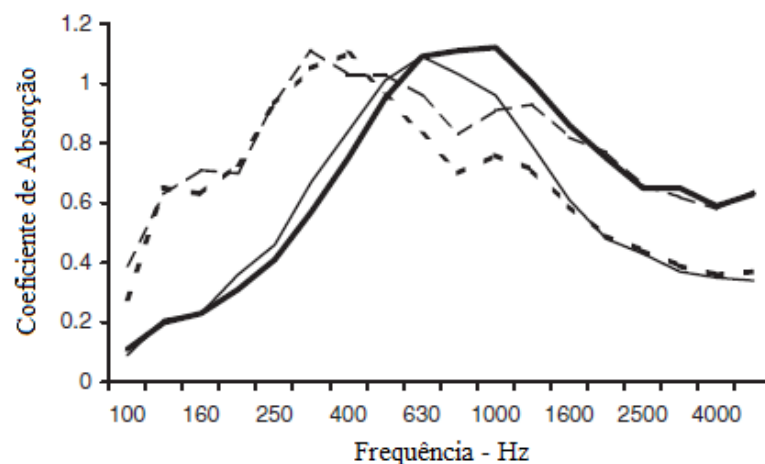


Figura 4.3 - Coeficiente de absorção para incidência aleatória para diferentes absorvedores de Helmholtz: — orifício pequeno, cavidade rasa; — orifício grande, cavidade rasa; ..... orifício pequeno, cavidade profunda; - - - orifício grande, cavidade profunda. [Adaptado de 16]

### 4.3. DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS PAINÉIS ABSORVEDORES PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS

#### 4.3.1. ANÁLISE CONCEPTUAL

##### 4.3.1.1 Painéis Desenvolvidos

Os sistemas absorvedores desenvolvidos no presente trabalho destinam-se essencialmente a salas consideradas pequenas do ponto de vista acústico. Nestes espaços, e como já foi referido, os maiores problemas da acústica envolvente são os modos próprios nas baixas frequências.

Para uma intervenção eficaz nesta gama, optou-se por um absorvedor de baixas frequências de canto, isto é, uma espécie de *bass-corner*. O facto dos painéis absorvedores estarem localizados nos cantos da sala deve-se à máxima pressão concentrada nesta zona da sala e devido ao facto de qualquer onda sonora, ao atingir um canto, ser redirecionada para a fonte, independentemente do ângulo de incidência. Nesta zona da sala, os modos próprios têm uma máxima pressão e a velocidade das partículas é muito baixa; daí a escolha da localização dos painéis nos cantos, pois a absorção é bastante mais eficaz.

A absorção nas baixas frequências pode ainda ser ampliada através da introdução de um amortecimento adicional na caixa-de-ar. Uma grande vantagem da disposição dos painéis nesta zona da sala é o aproveitamento da caixa-de-ar no tardo do painel, pois com o aumento da caixa-de-ar, o coeficiente de absorção sonora aumenta de uma forma muito acentuada nas baixas frequências e até cerca dos 1000 Hz.

Numa fase inicial, tornou-se obrigatório refletir sobre a melhor forma de criar um produto (com base nos materiais utilizados pela *Castelhano & Ferreira*), economicamente viável e que se adaptasse facilmente a qualquer ambiente de trabalho ou lazer. Aqui surge o conceito de elementos modulares. Um elemento de fácil mobilidade permite também uma maior aplicabilidade, consoante o que se pretende em determinado espaço.

A ideia inicial parte da criação de uma estrutura base prismática, de secção triangular que poderá ser usada quer com uma membrana ressonante quer com painel perfurado, uma vez que apenas se altera a parte da frente do painel e os elementos absorvedores internos. Nos casos em que se opta por uma maior absorção é possível a disposição de mais de um painel por canto da sala. Deste modo, a altura dos painéis pode ser disposta de uma forma variável de acordo com as necessidades do espaço. Para além disso, a estrutura base dos painéis (caixa prismática) apresenta dimensões fixas, o que permite a variação do painel frontal e dos elementos absorvedores no seu interior.

Analisa-se o comportamento individual de quatro painéis distintos através do programa *acoustic modelling* [25]. Deste modo é possível uma análise comportamental da absorção em função da frequência emitida através do método da matriz transferência.

#### 4.3.1.2 Painel Liso com Lã-de-Rocha de 200 mm (L200)

O painel liso com lã-de-rocha de 200 mm (L200) apresenta as seguintes características:

- Massa superficial do painel liso: 3,5 kg/m<sup>2</sup>
- Caixa-de-ar 1: 10 cm
- Lã-de-rocha: 20 cm
- Resistividade ao fluxo de ar da lã-de-rocha: 12000 Pa.s/m<sup>2</sup>
- Caixa-de-ar 2: 19,5 cm
- Altura: 110 cm

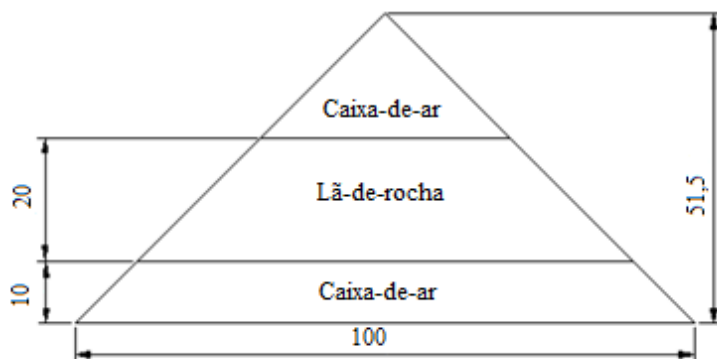


Figura 4.4 – Dimensões [cm] em planta: painel liso com lã-de-rocha de 200 mm (L200)

A Figura 4.5 representa o possível comportamento experimental do painel [25]. Através da observação e análise da figura constata-se que o painel está sintonizado para uma máxima absorção de pico de 60 Hz. A relação absorção/frequência é dada para uma temperatura do ar de 22 °C e para uma pressão do ar de 101325 Pa.

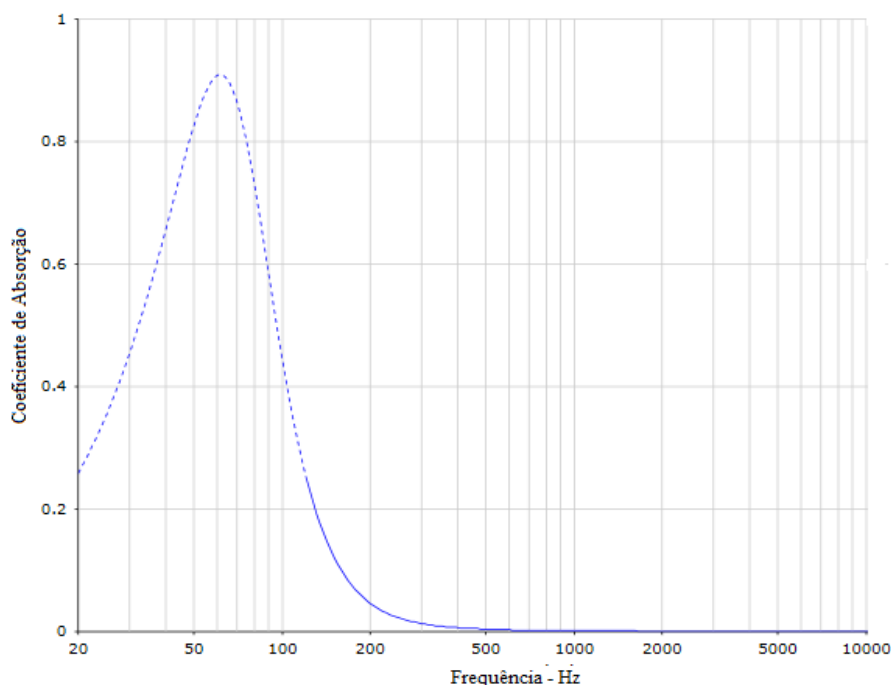


Figura 4.5 - Coeficiente de absorção sonora do painel liso com lã-de-rocha de 200 mm (L200) em função da frequência [25]

#### 4.3.1.3 Painel Perfurado com Lã-de-Rocha de 200 mm (P200)

O painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm (P200) apresenta as seguintes características:

- Painel perfurado: 0,5 cm
- Furos de 1,2 cm de diâmetro com 10 cm de espaçamento
- Caixa-de-ar 1: 10 cm
- Lã-de-rocha: 20 cm
- Resistividade ao fluxo de ar da lã-de-rocha: 12000 Pa.s/m<sup>2</sup>
- Caixa-de-ar 2: 19,5 cm
- Altura: 110 cm

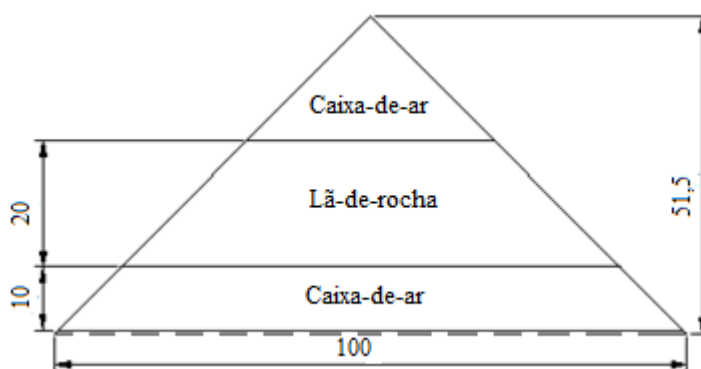


Figura 4.6- Dimensões [cm] em planta: painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm (P200)

Observando a Figura 4.6, o painel perfurado com lã-de-rocha apresenta exatamente as mesmas características internas do painel da Figura 4.4, diferindo apenas o seu painel frontal constituído por uma placa de madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*), perfurada e com furos de diâmetro de 12 mm espaçados de 100 mm.

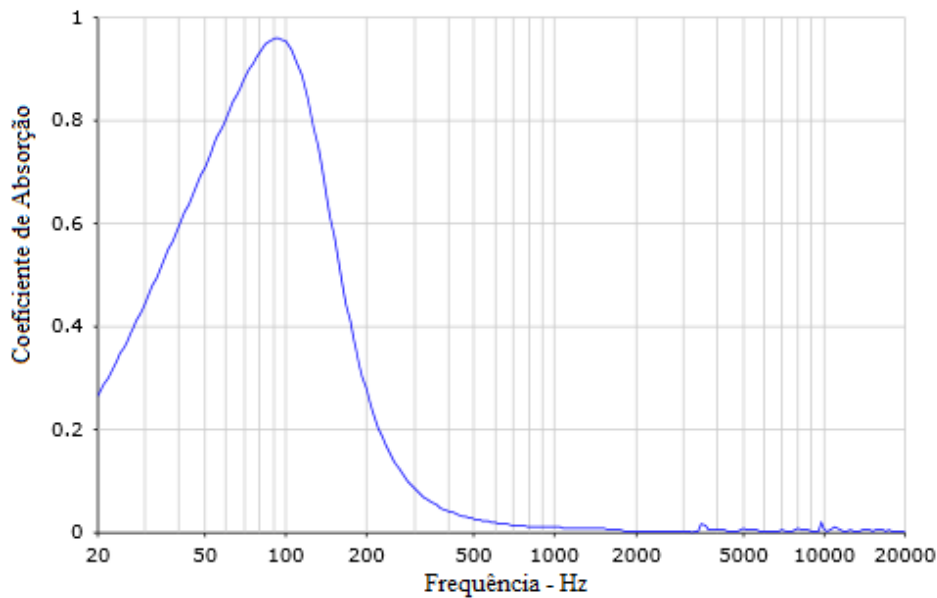


Figura 4.7 - Coeficiente de absorção do painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm (P200) em função da frequência [25]

No que concerne à análise teórica de absorção do painel nas baixas frequências, a Figura 4.7 aponta para uma maior gama de frequência de absorção e para um pico máximo mais elevado relativo ao painel liso com lã-de-rocha de 200 mm.

#### 4.3.1.4 Painel Perfurado com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100)

O painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100) apresenta as seguintes características:

- Painel perfurado: 0,5 cm
- Furos de 1,2 cm de diâmetro com 10 cm de espaçamento
- Caixa-de-ar 1: 1 cm
- Lã-de-rocha: 10 cm
- Resistividade ao fluxo de ar da lã-de-rocha: 6000 Pa.s/m<sup>2</sup>
- Caixa-de-ar 2: 38,5 cm
- Altura: 110 cm

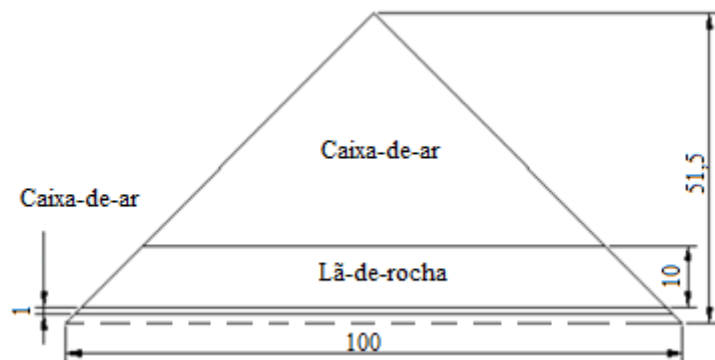


Figura 4.8 – Dimensões [cm] em planta: painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100)

A Figura 4.9 exibe uma maior e mais ampla gama de absorção nas baixas frequências. Este painel está igualmente sintonizado para uma frequência de pico máxima de aproximadamente 65 Hz.

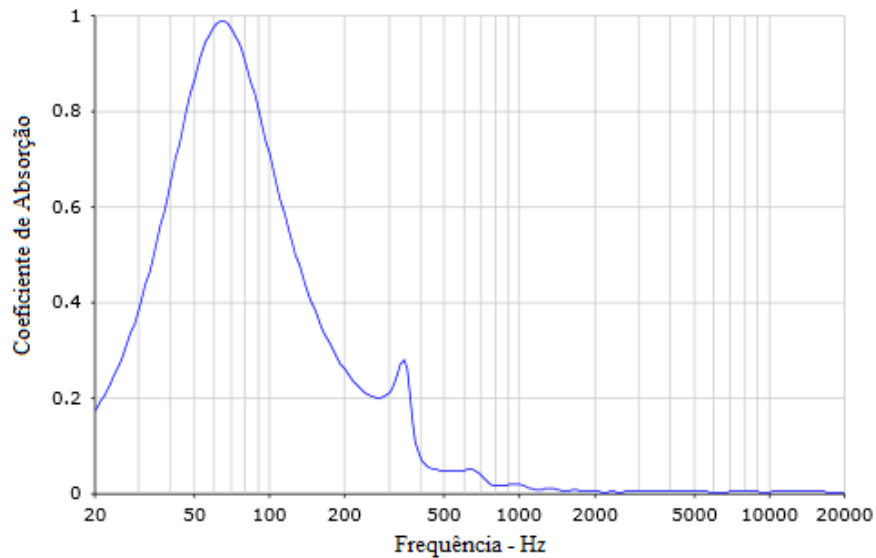


Figura 4.9 - Coeficiente de absorção do painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100) em função da frequência [25]

#### 4.3.1.5 Painel Liso com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100)

O painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) apresenta as características que se seguem:

- Massa superficial do painel liso:  $3,5 \text{ kg/m}^2$
- Caixa-de-ar 1: 1 cm
- Lã-de-rocha: 10 cm
- Resistividade ao fluxo de ar da lã-de-rocha:  $6000 \text{ Pa.s/m}^2$
- Caixa-de-ar 2: 38,5 cm
- Altura: 110 cm

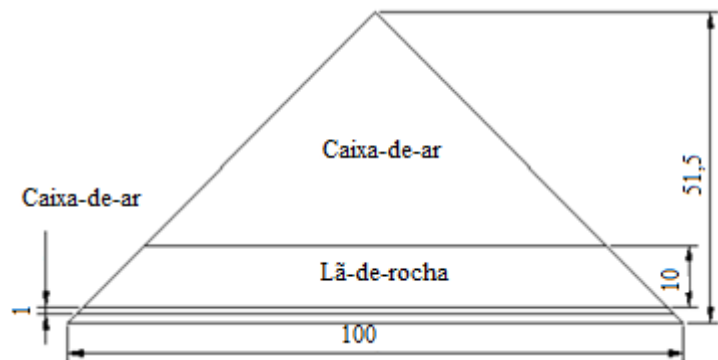


Figura 4.10 – Dimensões [cm] em planta: painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100)

A Figura 4.11 apresenta, por sua vez, uma menor amplitude de absorção nas baixas frequências relativamente ao painel perfurado liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100). No que diz respeito à frequência de pico máxima, este valor situa-se aproximadamente nos 45 Hz.

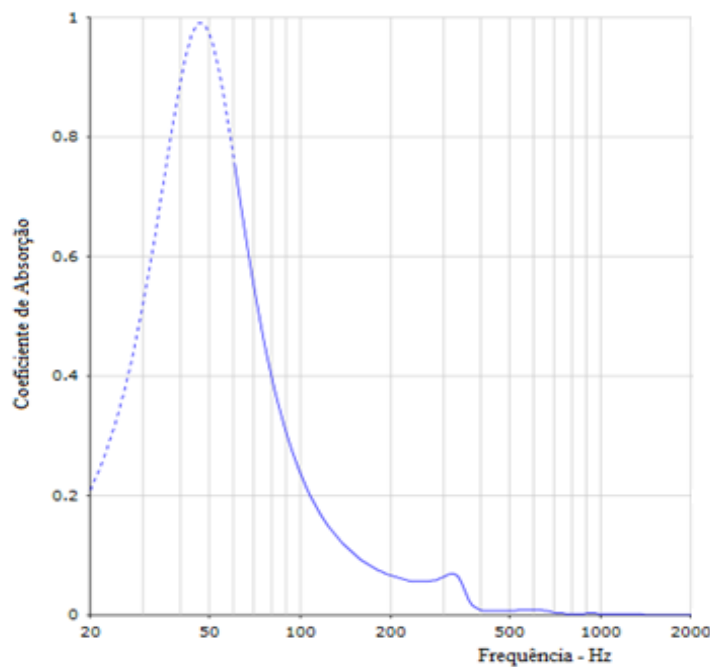


Figura 4.11 - Coeficiente de absorção do painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) em função da frequência [25]

#### 4.3.2. ESTRUTURA

Os elementos desenvolvidos para a estrutura assentam numa base que proporciona a sustentação do conjunto. Dessa base faz parte uma moldura localizada na frente do elemento para fixar o painel a ensaiar, para ensaiar, para possibilitar a troca fácil dos painéis e o fecho da “caixa” -

Figura 4.12. O design dos elementos esteve a cargo do departamento de design da Castelhana & Ferreira. A

Figura 4.12 mostra o desenho esquemático e o princípio de montagem de um elemento (protótipo). Foram desenvolvidos oito elementos com as mesmas dimensões exteriores de forma a permitir as medições dos painéis separadamente fazendo variar as características do conjunto.

O elemento modelo apresenta dimensões exteriores de 1,10 m de altura, 1,00 m de largura e 0,515 m de profundidade. Tanto a altura como a largura do painel foram previstas de modo a minimizar o desperdício de material, a profundidade do painel é resultado da caixa-de-ar e do isolamento pretendidos.

Toda a estrutura base é executada em madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) de 20 mm de espessura.

Para o interior do painel foram desenvolvidos sistemas de encaixe (idênticos em todos os painéis) do material absorvedor (lã-de-rocha), o posicionamento deste é mantido através de um arame enrolado nuns “camarões” (Figura 4.13).

Através do capítulo 2, percebe-se que a frequência de ressonância nas baixas frequências, corresponde àquela em que a absorção sonora é máxima e diminui com o aumento da caixa-de-ar. Se se pretende direccionar a absorção para as baixas frequências (50 a 100 Hz) é necessário aumentar ou utilizar maiores espessuras da caixa-de-ar. Deste modo, as dimensões das caixas-de-ar de cada um dos elementos absorvedores são aproveitadas conforme a profundidade destes. Note-se que as dimensões dos elementos foram escolhidas simultaneamente com a definição do tipo de elemento, procurando-se

direcionar a frequência de ressonância do sistema para as baixas frequências. Sem esta análise seria difícil tomar uma decisão acerca da espessura da caixa-de-ar em cada caso, pois a variável a definir (frequência de ressonância), é o resultado da divisão da profundidade do painel (espessura da caixa-de-ar) e material absorvedor, e ainda do tipo e área de furação existente.

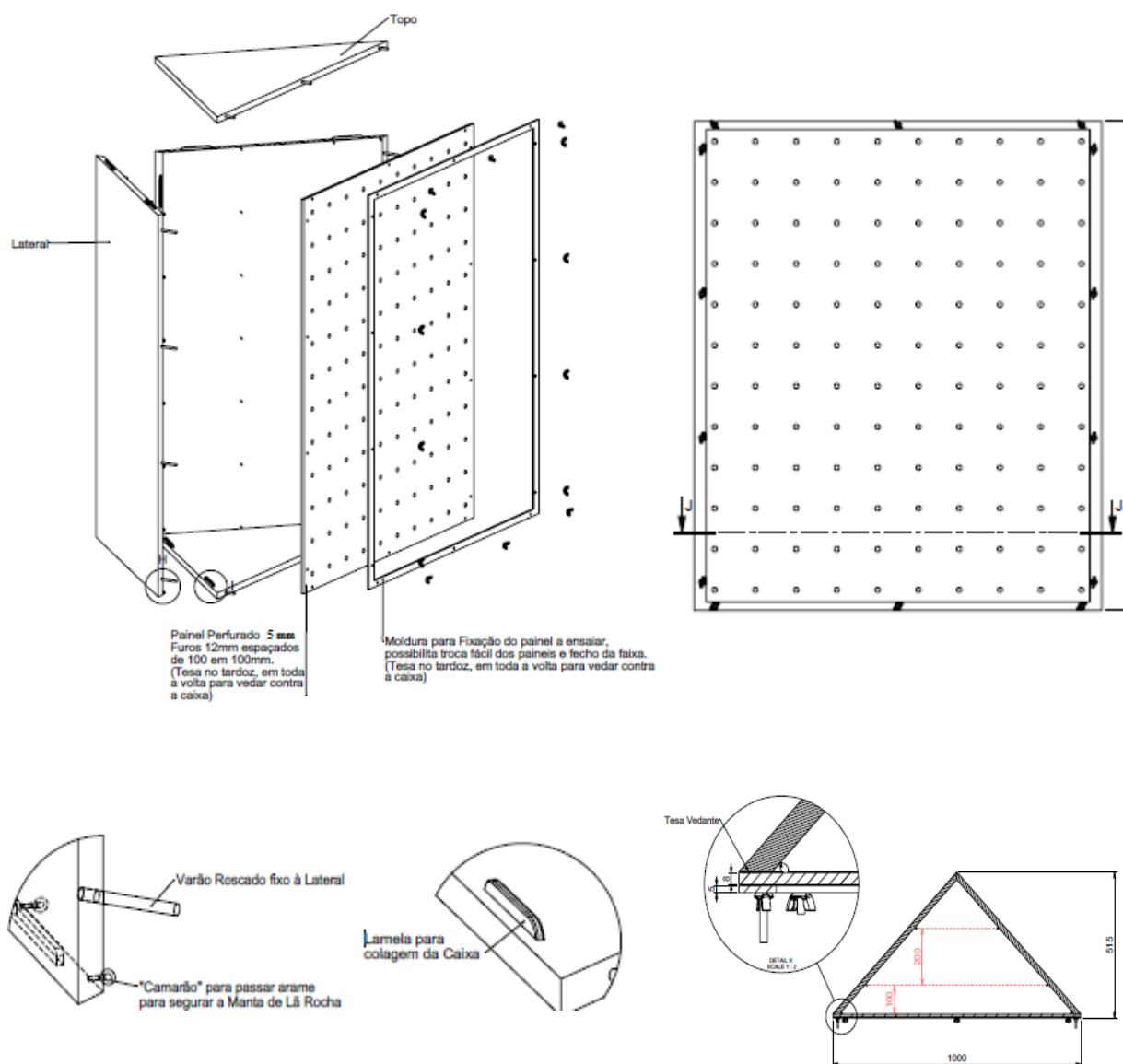


Figura 4.12 - Modelo estruturante do protótipo desenvolvido para o painel absorvedor de baixas frequências - *bass-corner* [26]

As Figuras 4.13 a 4.18 apresentam a sequência de montagem exemplificativa de um painel após a montagem de toda a estrutura no laboratório.



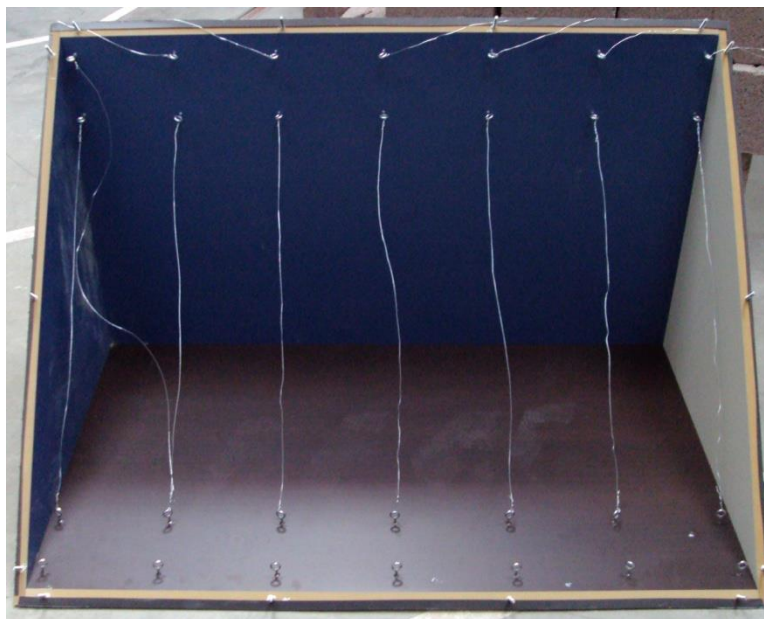


Figura 4.13 - Estrutura preparada com arames e "camarões" para suportar a lã-de-rocha de 100 mm [Fotografia da Autora]

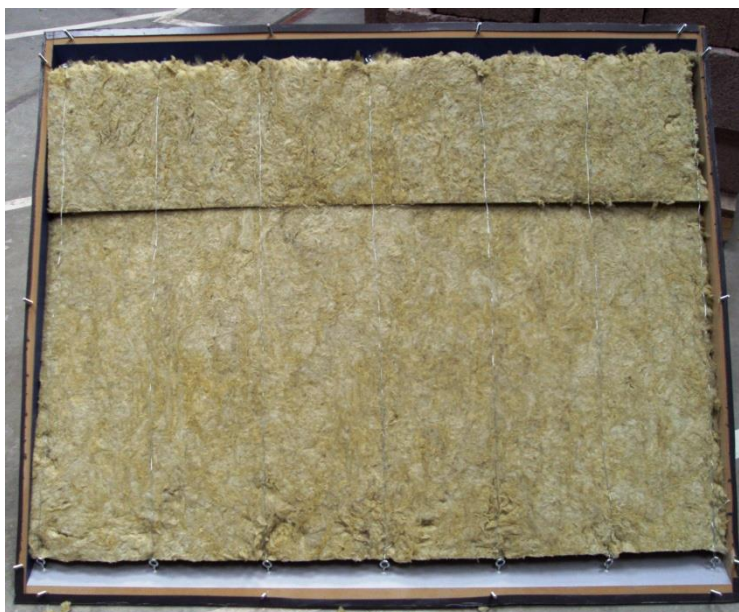


Figura 4.14 - Painel após a colocação de lã-de-rocha de 100 mm [Fotografia da Autora]



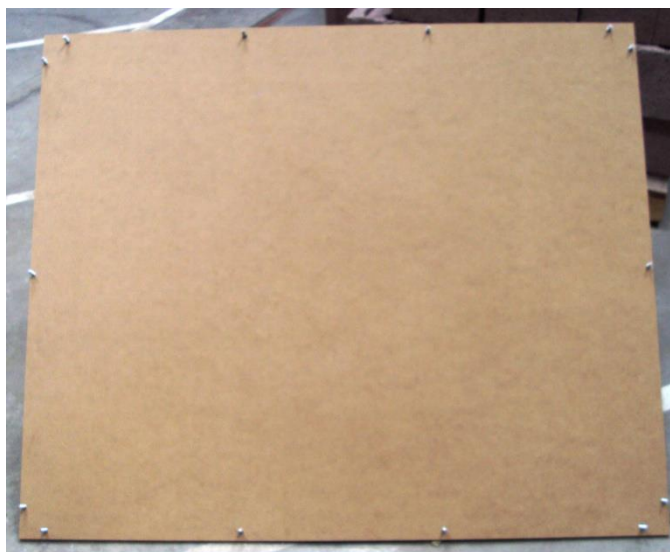


Figura 4.15 - Colocação do painel frontal [Fotografia da Autora]



Figura 4.16 - Painel liso (L) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora]



Figura 4.17 - Painel perfurado (P) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora]

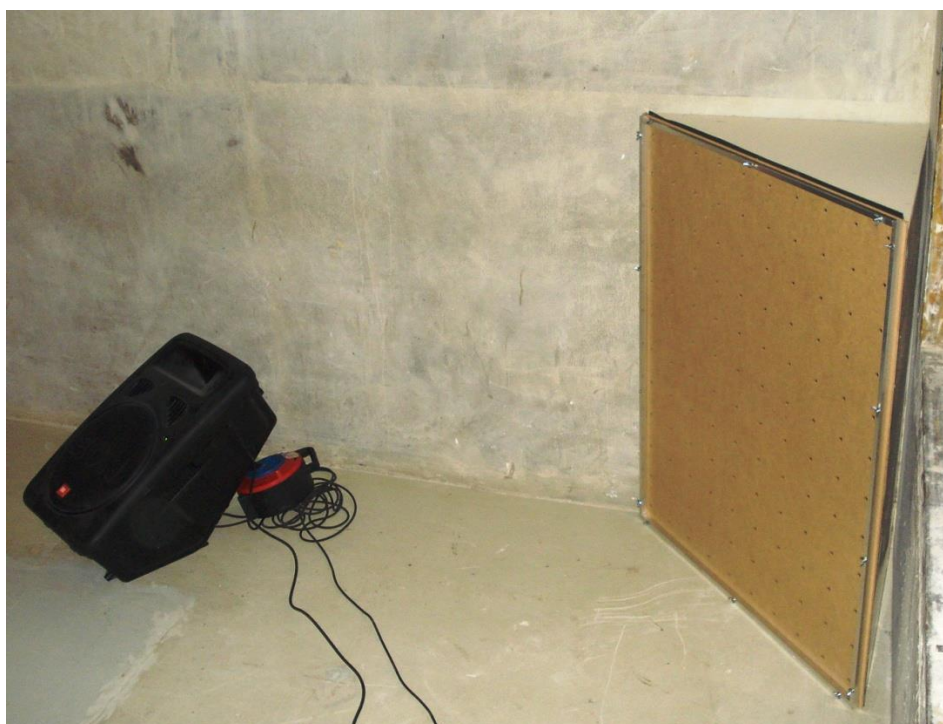


Figura 4.18 - Vista lateral de um painel perfurado (P) após a montagem e colocado num canto [Fotografia da Autora]

## 5 ENSAIO EM CÂMARA REVERBERANTE

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO

Os protótipos definidos foram testados na câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP (Figura 5.1) e na câmara reverberante E1 (mais pequena que a anterior) simulando uma sala real.

A câmara reverberante R1 tem as dimensões de 5,60 a 6,15 m de largura, 7,0 a 7,5 m de comprimento, e uma altura de 4,65 m (Figura 5.3) e apresenta um volume de aproximadamente 207 m<sup>3</sup>. Uma das paredes tem uma abertura de 3,30×3,10 m<sup>2</sup>, que para efeitos deste trabalho se encontrava fechada. Possui ainda cinco difusores acrílicos suspensos no teto, dimensionados/posicionados de acordo com a norma NP EN 140-1 (Figura 5.2). Por sua vez, a câmara reverberante E1 apresenta um volume de 106 m<sup>3</sup> e, durante o decorrer dos ensaios, estará ocupada com objetos simulando uma sala real.



Figura 5.1 - Entrada da câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP [Fotografia da Autora]



Figura 5.2 – Aspeto interior da câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP [Fotografia da Autora]

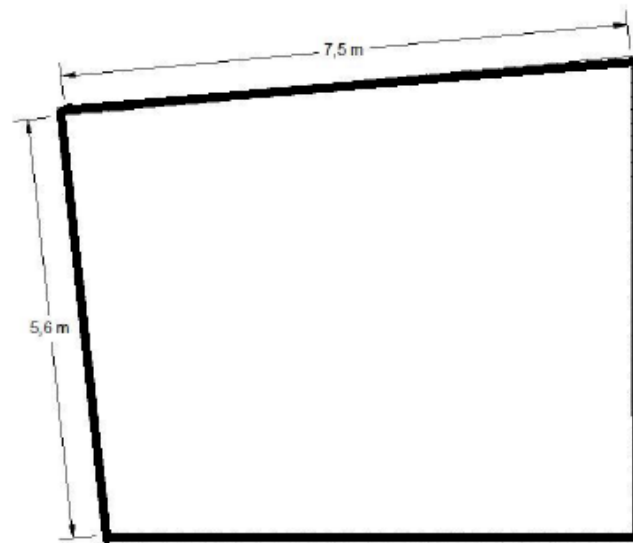


Figura 5.3 - Planta esquemática da câmara reverberante R1 do laboratório de Acústica da FEUP

## 5.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO

### 5.2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A absorção sonora medida em câmara reverberante, segundo a norma NP EN ISO 354 [27], é uma medição indireta pois aí é determinado o tempo de reverberação. Os valores do tempo de reverberação medidos antes e depois da colocação dos provetes permite, com recurso às fórmulas de previsão apresentadas no capítulo 2, determinar a área de absorção sonora equivalente, ( $A_T$ ), com a introdução dos provetes.

Quando o provete a ensaiar é um material que preenche uma dada superfície, o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) pode ser determinado através do quociente da área de absorção sonora equivalente ( $A_T$ ) determinada no ensaio, pela área real ( $S$ ) que o material ocupa [27].

Por sua vez, se os provetes em questão são elementos individuais mas idênticos entre si, como é aqui o caso, a área de absorção sonora equivalente de cada provete é obtida dividindo a área de absorção sonora equivalente total ( $A_T$ ) pelo número de provetes existentes na câmara [27].

### 5.2.2. GAMA DE FREQUÊNCIAS

Segundo a norma NP EN ISO 354:2007 [27], as medições acústicas em câmara reverberante devem ser realizadas em bandas de frequência de terço de oitava, com frequências centrais dos 100 aos 5 kHz. Contudo, uma vez que o objetivo do presente trabalho se foca na medição da absorção de baixas frequências dos painéis acústicos, foram ensaiadas outras quatro bandas de frequência abaixo do intervalo referido, de acordo com a norma NP EN ISO 266 [29] e ignoradas as bandas de frequências mais elevadas (Quadro 5.1 - Bandas de terço de oitava medidas durante os ensaios em câmara reverberante).

Quadro 5.1 - Bandas de terço de oitava medidas durante os ensaios em câmara reverberante

Frequências de Bandas de Terço de Oitava				
40	50	63	80	100
125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000

### 5.2.3. DISPOSITIVOS DE ENSAIO

#### 5.2.3.1 Câmara Reverberante e Campo Sonoro Difuso

As dimensões e forma da câmara reverberante deverão ser tais que permitam verificar a seguinte condição [27]:

$$l_{max} \leq 1,9 \times V^{1/3} \quad (5.1)$$

em que  $L_{max}$  é o máximo comprimento (m) em linha reta nos limites da câmara. No caso de câmaras retangulares,  $L_{max}$  é a maior das diagonais principais.  $V$  é o volume da câmara reverberante ( $m^3$ ). O  $L_{max}$  da câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP pode ser determinado com recurso à seguinte equação:

$$l_{max} = \sqrt{\left(\frac{5,60+6,15}{2}\right)^2 + \left(\frac{7+7,5}{2}\right)^2 + 4,65^2} = 10,42 \text{ m} \quad (5.2)$$

Sabendo que o volume da câmara reverberante é de aproximadamente 207  $m^3$ , e comparando o resultado obtido com a equação 5.1, vem:

$$10,42 \leq 11,24 \text{ m} \rightarrow \text{O.K.} \quad (5.3)$$

A área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia, determinada por banda de terço de oitava, não deverá exceder os valores indicados na NP EN ISO 354 [27].

Uma vez que o volume da câmara reverberante ultrapassa os 200  $m^3$ , os valores normativos foram multiplicados pelo fator  $(V/200)^{2/3}$  (Quadro 5.2).



Quadro 5.2 - Limite da área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia [27]

Frequência (Hz)	Área de Absorção (m <sup>2</sup> )	Frequência (Hz)	Área de Absorção (m <sup>2</sup> )
100	6,66	400	6,66
125	6,66	500	6,66
150	6,66	630	6,66
200	6,66	800	6,66
250	6,66	1000	7,17
315	6,66	1250	7,17

A área de absorção sonora equivalente da câmara vazia, no domínio da frequência, deve ser regular e não apresentar picos nem depressões de amplitude superior a 15% da média dos valores correspondentes às duas bandas de terços de oitava adjacentes [27].

A Figura 5.4 ilustra os valores medidos da área de absorção sonora equivalente na câmara reverberante, enquanto vazia ( $A_0$ ), assim como os respectivos valores máximos majorados preestabelecidos na norma NP EN ISO 354 [27]. Dado que a norma não apresenta valores abaixo dos 100 Hz e visto que este estudo se focaliza na análise de baixas frequências (a partir dos 40 Hz), foram considerados valores normativos de 6,66 m<sup>2</sup> para a área de absorção sonora equivalente dos 40 aos 80 Hz.

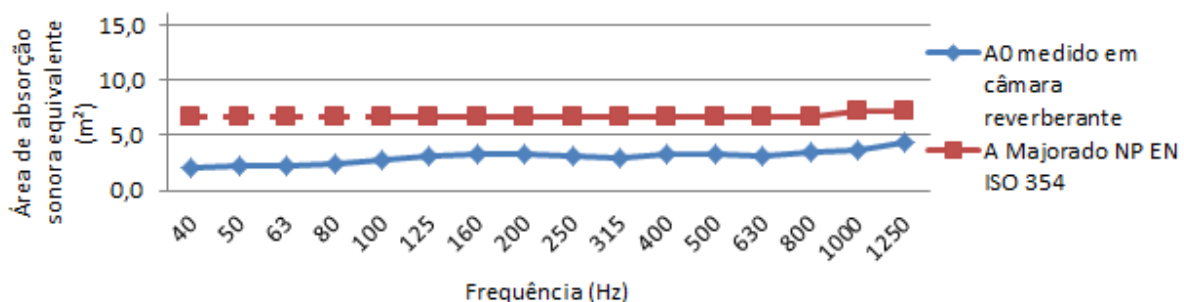


Figura 5.4- Área de absorção sonora equivalente na câmara reverberante vazia ( $A_0$ ) comparada com o limite máximo da norma NP ISO 354 [27]

### 5.2.3.2 Provetes de Ensaio

Os provetes de ensaio podem apresentar várias formas e dimensões. O método de colocação e ensaio do provete na câmara reverberante varia com o tipo de provete. De acordo com a norma NP ISO 354 [27], os elementos a ensaiar podem ser classificados como elementos absorventes planos ou elementos absorventes discretos. No âmbito do presente trabalho os elementos a ensaiar enquadram-se na categoria de elementos absorventes discretos. São instalados e posicionados de acordo com o seu funcionamento e prática corrente. Como tal foram colocados verticalmente quatro elementos absorvedores nos cantos da câmara reverberante, a fim de se obter uma variação da área de absorção sonora equivalente na câmara suficientemente relevante. Cada painel apresenta uma profundidade de aproximadamente 50 cm, uma largura de 1 m e uma altura de 1,10 m. Os elementos absorvedores são testados em duas situações, nos cantos (*bass-corners*) e ao centro da câmara, com o objetivo de

salientar as diferenças entre as duas disposições, para além das diferenças relativas às suas características. Embora não estando abrangido por qualquer disposição na norma, teve-se o cuidado de afastar os elementos a ensaiar de pelo menos 1 m dos microfones.

As variações de temperatura e humidade relativa durante as medições podem influenciar o tempo de reverberação, especialmente nas altas frequências. No entanto, os valores recomendados da humidade relativa devem estar situados entre os 30% e os 60% e a temperatura não deverá estar abaixo dos 15 °C em qualquer momento do ensaio. Para todas as medições, as correções para a variação da absorção do ar devem ser aplicadas de acordo com o parâmetro  $m'$  (Quadro 5.3).

Após a introdução dos elementos a ensaiar na câmara reverberante, espera-se que estes atinjam o equilíbrio relativamente à temperatura e à humidade relativa na câmara, antes de serem realizados os ensaios.

Quadro 5.3- Valores de absorção do ar ( $m'$ ) para várias condições de humidade relativa, em função da frequência [Adaptado de 2]

HR (%)	< 1 kHz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
0	0	0	0	0
20	0	0,008	0,016	0,056
40	0	0,004	0,008	0,044
60	0	0,003	0,004	0,028
80	0	0,002	0,004	0,008

### 5.3. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

#### 5.3.1. INTRODUÇÃO

A medição do tempo de reverberação numa dada câmara é feita, segundo a norma [27], através de dois possíveis métodos de análise das curvas de decaimento: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada. O método do ruído interrompido resulta de um processo estatístico, sendo necessário calcular a média das várias curvas de decaimento, ou tempos de reverberação, medidos para uma dada posição da fonte/microfone. O método da resposta impulsiva integrada, por sua vez, baseia-se numa função determinística, obtendo as curvas de decaimento a partir da integração de limites invertidos no domínio do tempo do quadrado da resposta impulsiva.

No Laboratório de Acústica e no âmbito do presente trabalho, utiliza-se o método do ruído interrompido.

#### 5.3.2. RECETORES E FONTES SONORAS

Os recetores usados nas medições devem ser omnidirecionais. Os registos são feitos com diferentes posições dos microfones afastados entre si, de 1,5 m no mínimo, a 2 m da fonte sonora e a pelo menos 1 m de distância das superfícies da câmara reverberante e do provete. As curvas de decaimento medidas para as diferentes posições dos microfones não deverão ser combinadas devido ao facto do campo criado não ser perfeitamente difuso.

A fonte sonora deverá emitir igualmente uma radiação omnidirecional, devendo utilizar-se várias posições, com um espaçamento mínimo de 3 m. O número de curvas de decaimento independentes

registadas deve ser pelo menos 12. São utilizadas duas fontes sonoras simultaneamente. Contudo, é importante salientar que a diferença na potência radiada deverá ser menor ou igual a 3 dB em cada banda de terço de oitava. Durante os ensaios, foram utilizados quatro microfones e duas fontes sonoras. Exemplificam-se na Figura 5.5 quatro posições dos microfones e duas posições da fonte sonora.

### 5.3.3. MÉTODO DO RUÍDO INTERROMPIDO

A fonte sonora utilizada no método do ruído interrompido apresenta um espectro contínuo de banda larga uniforme em todas as frequências (ruído branco). Quando se utiliza um ruído de banda larga e um analisador em tempo real, o espectro do ruído usado deve ser tal que as diferenças nos níveis de pressão sonora resultantes na câmara sejam menores que 6 dB em bandas de terço de oitava adjacentes [27]. O sinal deverá ser suficientemente longo para produzir níveis de pressão sonora constantes nas várias bandas de frequências. Para obter condições constantes, recomenda-se que o tempo de excitação seja de pelo menos metade do tempo estimado para o tempo de reverberação esperado. Por sua vez, o nível estabilizado do sinal de ensaio deve ser suficientemente elevado para que o nível mínimo seja pelo menos 10 dB superior ao ruído de fundo [27].

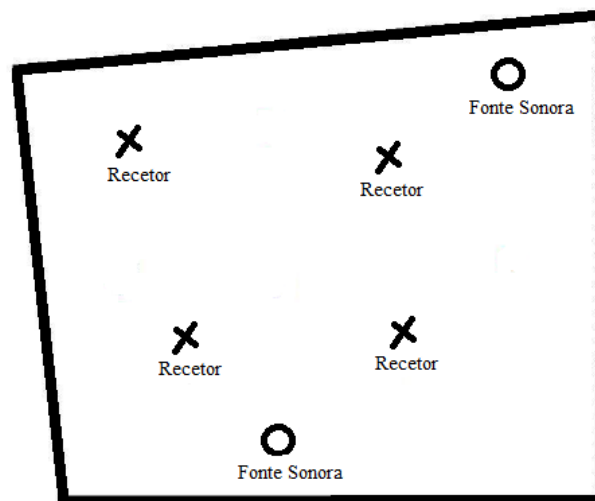


Figura 5.5 - Posição exemplificativa dos recetores e fontes sonoras durante o ensaio

A fim de reduzir a incerteza das medições, causada por desvios estatísticos, são feitas várias medições (número mínimo de três medições) em cada posição de fonte/microfone. Após este procedimento obtêm-se os valores médios ou das curvas de decaimento ou do tempo de reverberação. Podem ser utilizados dois métodos para o cálculo da média. Um dos métodos consiste em calcular a média das curvas de decaimento registadas para uma posição de fonte/microfone usando a seguinte expressão:

$$L_p(t) = 10. \log \left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (5.4)$$

onde:  $L_p(t)$  - nível de pressão sonora médio, no instante  $t$ , calculado para um número total de  $N$  decaimentos;



$L_{pn}(t)$  - nível de pressão sonora do decaimento de ordem  $n$ , no instante  $t$ .

Realizado durante o decorrer dos ensaios, este método, conhecido como “média do conjunto” é muito utilizado nos sistemas informatizados de medição do tempo de reverberação. No que se refere à média das curvas de decaimento, esta deve ser determinada para cada posição do emissor/recetor. Estabelecida uma posição, a partir de cada curva de decaimento, obtém-se o tempo de reverberação correspondente por banda de frequência de terço de oitava. Repete-se o mesmo cálculo para todas as combinações de emissor/recetor, obtendo-se um conjunto de tempos de reverberação médios. O tempo de reverberação final da câmara é portanto obtido através da média aritmética de todos os valores dos tempos de reverberação medidos.

Vulgarmente, o tempo de reverberação avalia-se a partir do decaimento de 20 ou 30 dB (utilizado neste caso) e extrapola-se o valor obtido para os 60 dB. No ensaio em câmara reverberante o nível de pressão sonora inicial deverá ser 5 dB inferior ao nível de pressão sonora máximo, e o nível de pressão sonora final do intervalo deverá ser superior ao ruído de fundo em pelo menos 10 dB. Na primeira condição pretende-se que a curva de decaimento esteja perfeitamente formada, já na segunda condição tenta-se garantir que o intervalo avaliado não sofre interferência do ruído de fundo. Os sistemas de aquisição automatizados utilizam uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, no intervalo de avaliação, a fim de determinar o tempo de reverberação.

Segue-se uma listagem do equipamento e *software* utilizado durante os ensaios:

- Sistema de aquisição de dados *Brüel & Kjaer PULSE* – Tipo 3560-D;
- *Software* de aquisição e tratamento de dados *Brüel & Kjaer PULSE v. X*;
- Amplificador *LABGRUPPEN LAB300*;
- 2 Fontes sonoras *Brüel & Kjaer* – Tipo 4224;
- 4 Microfones *Brüel & Kjaer*  $\frac{1}{2}$  – Tipo 4190;
- Calibrador *Brüel & Kjaer* – Tipo 4226;
- Termo – higrómetro *Wm HTA 4200*.

## 5.4. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

### 5.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO E ÁREA DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE

Os tempos de reverberação, antes e depois da colocação do provete ( $T_0$  e  $T_1$ ) apresentados com duas casas decimais, são determinados através da média aritmética do total de medições.

A área de absorção sonora equivalente, antes e depois da colocação do provete na câmara reverberante ( $A_0$  e  $A_1$ ), em  $m^2$  e para cada banda de frequência é calculada de acordo com a expressão (5.5):

$$A_i = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot TR_i} - Vm_i \quad (5.5)$$

onde,  $V$  - volume da câmara reverberante vazia ( $m^3$ );

$c$  - velocidade de propagação do som no ar, celeridade (m/s);

TR- tempo de reverberação medido;

$m$  – coeficiente de atenuação devido à presença do ar/absorção sonora do ar ( $m^{-1}$ ), Quadro 5.3.

Da diferença da área de absorção equivalente antes e depois da colocação do provete de ensaio na câmara obtém-se o valor de  $A_T$ , isto é, da área de absorção sonora equivalente do provete, em  $m^2$ .

$$A_T = A_1 - A_0 = 55,3 \cdot V \left( \frac{1}{c_1 \cdot T_1} - \frac{1}{c_0 \cdot T_0} \right) - V(m_1 - m_0) \quad (5.6)$$

Uma vez que se trata de um conjunto de elementos absorventes discretos idênticos, a área de absorção sonora equivalente de um elemento ( $A_{obj}$ ) é obtida através da divisão de  $A_T$  pelo número de elementos ensaiados,  $n$  (5.7). O resultado, arredondado à décima, é depois apresentado na forma de área de absorção sonora equivalente, em  $m^2$ , por elemento individual.

$$A_{obj} = \frac{A_T}{n} \quad (5.7)$$

#### 5.4.2. CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

O coeficiente de absorção sonora,  $\alpha_s$ , é determinado dividindo a área de absorção sonora equivalente do provete,  $A_{obj}$ , pela área  $S$  do provete de ensaio em  $m^2$  - (5.8). O resultado obtido deverá ser arredondado à centésima.

$$\alpha_s = \frac{A_{obj}}{S} \quad (5.8)$$

Embora  $\alpha_s$  seja calculado com base na área de absorção sonora equivalente, é possível que a área de absorção de um provete altamente absorvedor seja superior à área real do mesmo, e consequentemente, superior à unidade (uma impossibilidade física). Note-se que apesar de se tratar de grandezas semelhantes, o modo de cálculo difere, razão pela qual o coeficiente de absorção sonora  $\alpha$  (teórico), definido relacionando a energia absorvida com aquela que incide num dado objeto, não pode tomar valores superiores à unidade. Os valores de  $\alpha_s$  superiores a 1 são assim devidos à difração do som nos bordos do elemento a ensaiar, o que o faz parecer (acusticamente) maior. Não existe qualquer tipo de método normalizado para ajustar este facto. No entanto, em projeto não se deverá usar valores superiores à unidade.

## 6 RESULTADOS EM CÂMARA REVERBERANTE

### 6.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo compara-se o comportamento nas baixas frequências dos elementos testados, com base nos resultados dos tempos de reverberação obtidos nos ensaios executados na câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP. Analisaram-se dois distintos cenários de disposição para cada conjunto de elementos: disposição C - quatro painéis colocados nos cantos da câmara (Figura 6.1 e 6.2) e disposição M – quatro painéis colocados ao centro desta (Figura 6.3 e 6.4). Nesta última configuração as faces laterais dos elementos também não se encontram à vista, pois estes encontram-se agrupados.



Figura 6.1 – Disposição C dos painéis durante os ensaios: painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante [Fotografia da Autora]

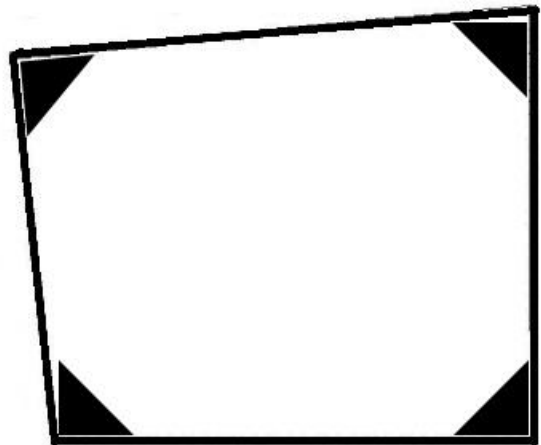


Figura 6.2 – Painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante (disposição C)

As análises e comparações efetuadas foram feitas tendo em conta a influência da variação de determinadas características dos elementos ao longo dos ensaios. Pretende-se assim chegar a conclusões que permitam sustentar a escolha de uma ou várias soluções que demonstrem potencial e capacidade de absorção nas frequências mais baixas e que mereçam um estudo mais aprofundado para eventual produto para o mercado.



Figura 6.3 – Disposição (M) dos painéis durante os ensaios:  
painéis agrupados no meio da câmara reverberante  
[Fotografia da Autora]

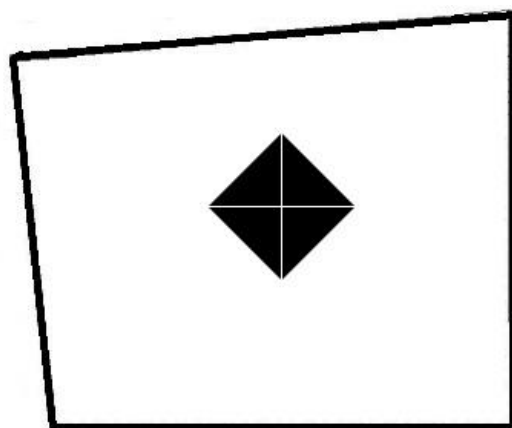


Figura 6.4 – Painéis agrupados no meio da câmara reverberante (disposição M)

## 6.2. ENSAIOS E RESULTADOS OBTIDOS

### 6.2.1. ENSAIOS REALIZADOS

Ensaíram-se doze configurações de elementos absorvedores, a fim de determinar os mais eficazes na absorção de baixas frequências (Quadro 6.1). Para isso, fizeram-se variar as características e disposições de cada um dos painéis. Em cada ensaio foram analisados conjuntos de quatro painéis.

Quadro 6.1- Ensaio realizado em câmara reverberante

<b>Código</b>	<b>Painel Frontal</b>	<b>Descrição do Interior</b>	<b>Disposição na Câmara Reverberante</b>
L0C	Liso	Sem Lã-de-Rocha	Cantos
L0M	Liso	Sem Lã-de-Rocha	Meio da Sala
P0C	Perfurado	Sem Lã-de-Rocha	Cantos
P0M	Perfurado	Sem Lã-de-Rocha	Meio da Sala
P200C	Perfurado	Com Lã-de-Rocha de 200 mm	Cantos
P200M	Perfurado	Com Lã-de-Rocha de 200 mm	Meio da Sala
L100C	Liso	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Cantos
L100M	Liso	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Meio da Sala
P100C	Perfurado	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Cantos
P100M	Perfurado	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Meio da Sala
L200C	Liso	Com Lã-de-Rocha de 200 mm	Cantos
L200M	Liso	Com Lã-de-Rocha de 200 mm	Meio da Sala

## 6.2.2. RESULTADOS

## 6.2.2.1 Parâmetros Avaliados

Para cada uma das configurações apresentadas, calculou-se a área de absorção sonora equivalente de cada elemento -  $A_{obj}$  (m<sup>2</sup>) e, secundariamente, os parâmetros adimensionais: coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_1$ ) tendo como referência unicamente a área frontal dos painéis (1,1 m<sup>2</sup>/painel) e o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_2$ ) tendo como referência todas as faces visíveis do painel (1,3575 m<sup>2</sup>/cada elemento).

Note-se que se utilizou o mesmo tempo de reverberação para efeitos de cálculo dos referidos coeficientes de absorção sonora  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ . Porém, para o cálculo do coeficiente de absorção sonora  $\alpha_1$ , seria possível adotar outros procedimentos aquando das medições em câmara reverberante: colocar no topo do painel um material com as mesmas características refletoras das paredes da câmara de forma a garantir apenas a absorção da frente do elemento, ou (mais difícil de executar) colocar os painéis todos empilhados até ao teto, para manter a área frontal dos painéis como única visível. Apesar da imprecisão destes valores, é importante ter uma ideia da percentagem de absorção retida em cada caso.

Uma vez que são quatro os elementos testados em cada ensaio, a área de absorção sonora equivalente de cada elemento ( $A_{obj}$ ) é obtida através da expressão (6.1).

$$A_{obj} = \frac{A_T}{4} \quad (6.1)$$

Por sua vez os coeficientes de absorção sonora  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são obtidos através das expressões (6.2) e (6.3).

$$\alpha_1 = \frac{A_{obj}}{S_{frontal}} = \frac{A_{obj}}{1,1} \quad (6.2)$$

$$\alpha_2 = \frac{A_{obj}}{S_{(frontal+topo)}} = \frac{A_{obj}}{1,3575} \quad (6.3)$$

6.2.2.2 Área de Absorção Sonora Equivalente ( $A_{obj}$ )

A área de absorção sonora equivalente medida para cada elemento ( $A_{obj}$ ) das configurações indicadas no Quadro 6.1, são apresentadas, por banda de terço de oitava, no Quadro 6.2 e na Figura 6.5.

Quadro 6.2 - Área de absorção sonora equivalente -  $A_{obj}$  (m<sup>2</sup>)

Painel	Bandas de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
L0C	0,6	0,9	1,2	0,8	0,5	0,4	0,5	0,5
L0M	0,1	0,2	0,7	0,6	0,5	0,0	0,2	0,1
P0C	0,1	0,4	0,4	0,5	1,2	0,5	0,5	0,5

Painel	Bandas de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
P0M	0,1	0,4	0,4	0,5	0,8	0,4	0,3	0,3
P200C	0,6	1,1	0,9	1,5	1,4	1,6	1,5	1,3
P200M	0,2	0,3	0,5	1,3	1,0	0,8	0,9	0,7
L100C	0,8	1,6	1,1	1,3	0,7	0,8	0,9	0,7
L100M	0,6	0,3	0,5	0,8	0,6	0,2	0,4	0,3
P100C	0,8	1,6	1,2	2,0	1,4	1,6	1,4	1,1
P100M	0,3	0,2	0,4	1,1	1,0	0,7	0,9	0,7
L200C	0,5	2,0	1,1	0,8	0,5	0,7	0,8	0,6
L200M	0,7	0,2	0,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,2

Painel	Bandas de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
L0C	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
L0M	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
P0C	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
P0M	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
P200C	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3
P200M	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
L100C	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
L100M	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
P100C	1,2	1,0	0,7	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
P100M	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2
L200C	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
L200M	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2

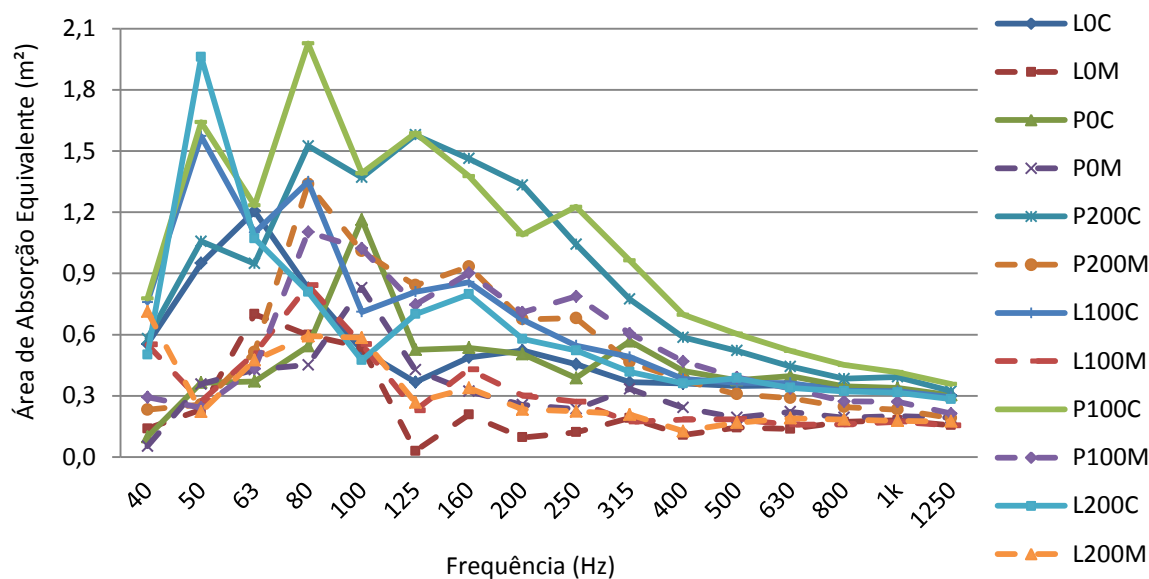


Figura 6.5 - Área de absorção sonora equivalente -  $A_{obj}$  (m²)

### 6.2.2.3 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_1$ )

O “coeficiente” de absorção sonora -  $\alpha_1$  (por m² de área frontal de painel), medido para cada configuração indicada no Quadro 6.1, é apresentado por banda de terço de oitava, no Quadro 6.3 e na Figura 6.6.

Quadro 6.3 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ )

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
L0C	0,50	0,86	1,10	0,75	0,48	0,33	0,44	0,47
L0M	0,13	0,21	0,64	0,54	0,49	0,03	0,19	0,09
P0C	0,09	0,33	0,34	0,49	1,06	0,48	0,49	0,46
P0M	0,05	0,33	0,39	0,41	0,75	0,39	0,29	0,23
P200C	0,53	0,96	0,86	1,39	1,25	1,44	1,33	1,21
P200M	0,21	0,23	0,47	1,22	0,92	0,76	0,85	0,61
L100C	0,69	1,43	1,00	1,23	0,65	0,74	0,78	0,61
L100M	0,50	0,25	0,46	0,77	0,50	0,21	0,39	0,27
P100C	0,71	1,49	1,12	1,84	1,26	1,44	1,25	0,99
P100M	0,27	0,22	0,39	1,00	0,93	0,68	0,82	0,64
L200C	0,46	1,78	0,97	0,74	0,43	0,64	0,72	0,53
L200M	0,65	0,20	0,43	0,54	0,53	0,24	0,31	0,21

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
L0C	0,41	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,29	0,27
L0M	0,11	0,17	0,10	0,13	0,13	0,16	0,16	0,14
P0C	0,35	0,52	0,38	0,34	0,36	0,31	0,31	0,28
P0M	0,21	0,30	0,22	0,18	0,20	0,18	0,18	0,18
P200C	0,95	0,70	0,53	0,47	0,40	0,35	0,36	0,29
P200M	0,62	0,42	0,34	0,28	0,26	0,22	0,21	0,17
L100C	0,50	0,45	0,35	0,33	0,33	0,30	0,29	0,27
L100M	0,25	0,16	0,17	0,17	0,14	0,15	0,16	0,14
P100C	1,12	0,88	0,63	0,55	0,47	0,41	0,38	0,33
P100M	0,72	0,55	0,43	0,35	0,31	0,25	0,25	0,19
L200C	0,47	0,38	0,33	0,35	0,31	0,29	0,29	0,26
L100C	0,20	0,19	0,12	0,15	0,17	0,17	0,16	0,16

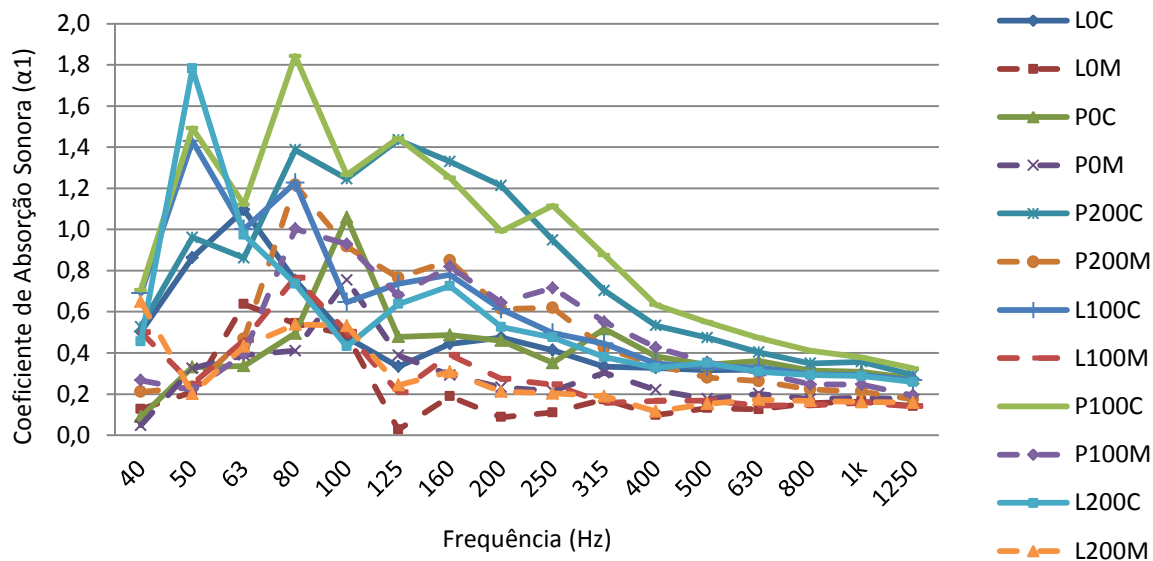


Figura 6.6 – “Coeficiente” de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ )

Uma vez que só se tem em conta a área do painel frontal, os valores obtidos no cálculo do “coeficiente”  $\alpha_1$  são por vezes superiores à unidade, pois considera-se que a absorção da área de topo do elemento se inclui na face frontal.

#### 6.2.2.4 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_2$ )

O coeficiente de absorção sonora -  $\alpha_2$  (por m<sup>2</sup> de área total exposta/painel frontal e topo) medido para cada configuração indicada no Quadro 6.1, é apresentado por banda de terço de oitava no Quadro 6.4.



Quadro 6.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ )

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
L0C	0,41	0,70	0,89	0,61	0,39	0,27	0,36	0,38
L0M	0,10	0,17	0,52	0,44	0,40	0,02	0,15	0,07
P0C	0,07	0,27	0,27	0,40	0,86	0,39	0,39	0,37
P0M	0,04	0,26	0,32	0,33	0,61	0,31	0,24	0,19
P200C	0,43	0,78	0,70	1,12	1,01	1,16	1,08	0,98
P200M	0,17	0,19	0,38	0,99	0,74	0,62	0,69	0,50
L100C	0,56	1,16	0,81	0,99	0,52	0,60	0,63	0,50
L100M	0,41	0,20	0,37	0,62	0,41	0,17	0,32	0,22
P100C	0,57	1,21	0,91	1,49	1,03	1,17	1,01	0,80
P100M	0,22	0,18	0,32	0,81	0,75	0,55	0,66	0,52
L200C	0,37	1,44	0,79	0,60	0,35	0,52	0,59	0,43
L200M	0,53	0,16	0,35	0,44	0,43	0,20	0,25	0,17

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
L0C	0,33	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,24	0,22
L0M	0,09	0,14	0,08	0,11	0,10	0,13	0,13	0,11
P0C	0,28	0,42	0,31	0,28	0,29	0,26	0,25	0,22
P0M	0,17	0,25	0,18	0,14	0,16	0,14	0,15	0,14
P200C	0,77	0,57	0,43	0,38	0,33	0,28	0,29	0,24
P200M	0,50	0,34	0,28	0,23	0,21	0,18	0,17	0,14
L100C	0,40	0,36	0,28	0,27	0,27	0,24	0,24	0,22
L100M	0,20	0,13	0,14	0,14	0,12	0,12	0,13	0,11
P100C	0,90	0,71	0,51	0,45	0,38	0,33	0,31	0,26
P100M	0,58	0,45	0,35	0,29	0,25	0,20	0,20	0,16
L200C	0,38	0,31	0,27	0,28	0,25	0,24	0,23	0,21
L100C	0,17	0,15	0,09	0,12	0,14	0,14	0,13	0,13

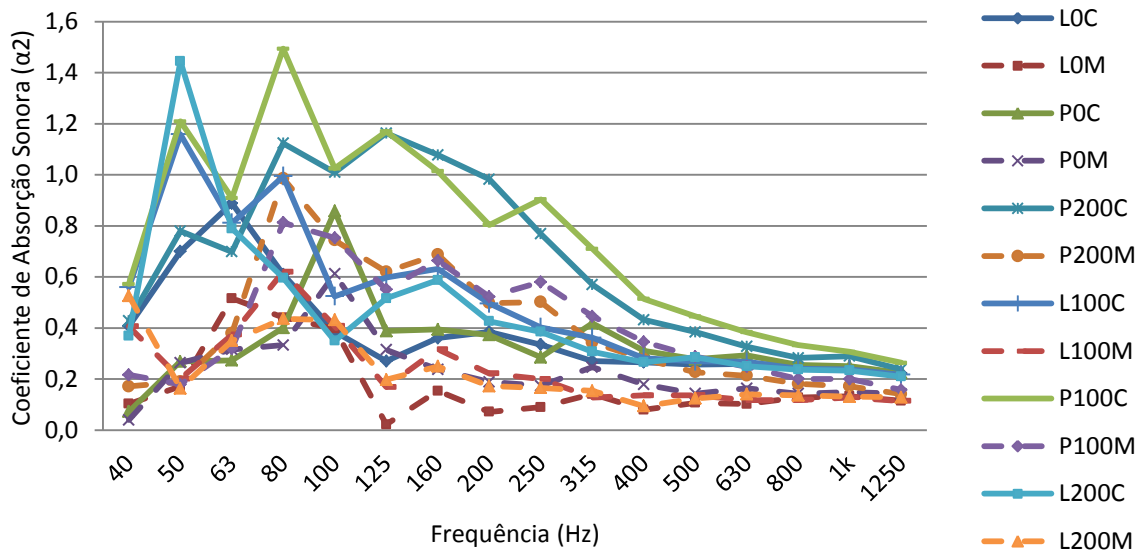


Figura 6.7 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ )

Os quadros e figuras relativas aos coeficientes de absorção sonora apresentam alguns valores superiores à unidade nas gamas de frequências mais baixas. Este fenómeno, fisicamente impossível, dever-se-á à sobrestimação dos valores de absorção. Despreza-se o volume ocupado pelos elementos absorvedores durante o ensaio em câmara reverberante, uma vez que o volume do conjunto de elementos ( $1,132 \text{ m}^3$ ) é muito pequeno quando comparado com o volume da câmara reverberante ( $207 \text{ m}^3$ ).

### 6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 6.3.1. PAINÉIS SEM MATERIAL POROSO ABSORSOR

##### 6.3.1.1 Objetivo

Nesta secção são analisados os resultados dos cálculos obtidos, bem como os parâmetros que podem ter mais influência nos resultados dos ensaios realizados em câmara reverberante.

##### 6.3.1.2 PAINEL LISO SEM LÃ-DE-ROCHA (L0)

A Figura 6.8 representa os valores da área de absorção sonora equivalente de um elemento com painel liso sem lã-de-rocha no seu interior. É feita uma comparação do comportamento do elemento situado ao canto (C) e ao meio da câmara (M).

Observando a Figura 6.8, percebe-se que o painel nas duas posições distintas apresenta um comportamento de absorção similar ao longo de todo espectro. Isto é, o pico de absorção de aproximadamente 63/70 Hz e a perda de absorção a partir dos 100 Hz, é semelhante nas duas simulações. Nesta configuração, a caixa-de-ar do elemento ocupa toda a profundidade do mesmo (51,5 cm).

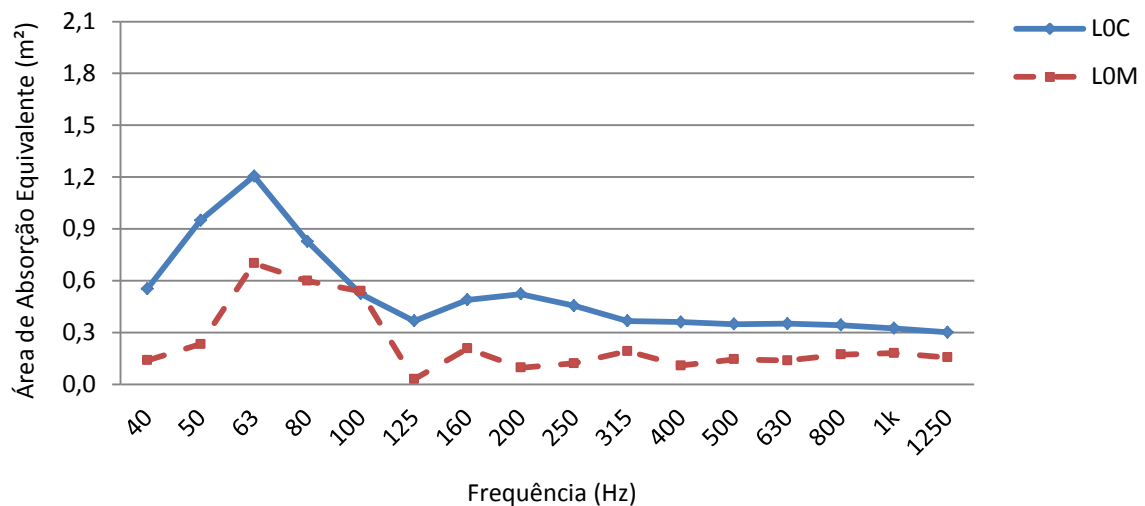


Figura 6.8 - Área de absorção sonora equivalente de um painel liso (L) sem lã-de-rocha -  $A_{obj}$  (m²)

Observa-se ainda o aumento significativo da absorção quando o elemento está posicionado no canto de uma sala, como era de prever. Isto deve-se à posição ocupada pelos elementos absorvedores na câmara. Na primeira disposição, com um elemento em cada canto da câmara reverberante, ocupa-se a área de base bem como as áreas laterais junto às paredes nos cantos, zonas de maior eficácia de absorção. Qualquer onda sonora, ao atingir um canto, é redirecionada para a fonte, independentemente do ângulo de incidência. A absorção é portanto mais eficaz com os elementos posicionados nos cantos devido à máxima pressão concentrada nesta zona e à baixa velocidade das partículas. A energia incidente neste painel é dissipada por amortecimento, devido à rigidez do meio, ligações existentes e ao amortecimento interno do painel, cujo máximo ocorre para a frequência de ressonância.

#### 6.3.1.3 Painel Perfurado Sem Lã-de-Rocha (P0)

A Figura 6.9 representa a área de absorção sonora equivalente de um elemento com painel perfurado sem lã-de-rocha no seu interior, assim como o seu comportamento no canto e no meio da câmara reverberante, ao longo do espectro de frequências.

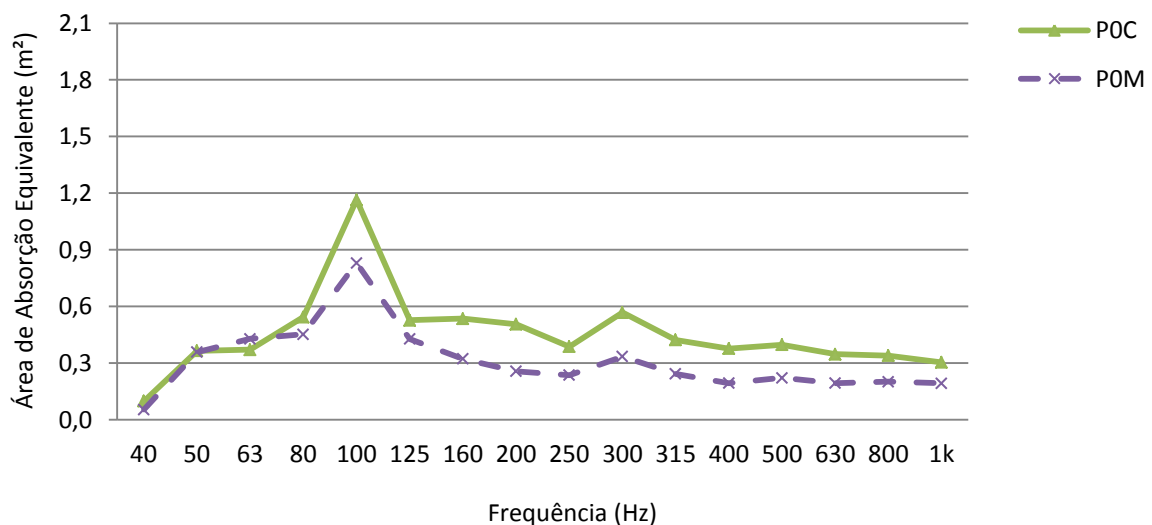


Figura 6.9 - Área de absorção sonora de um painel perfurado (P) sem lã-de-rocha -  $A_{obj}$  (m²)

Note-se que o painel foi dimensionado com uma perfuração circular de 12 mm de diâmetro espaçados de 100 mm. As ondas sonoras ao incidirem na superfície de entrada do gargalo imprimem deslocamentos alternados à massa de ar contida no mesmo, acompanhados de dissipação de energia devido ao atrito de ar contra as suas paredes. O respetivo painel apresenta um pico de absorção, que se mantém nas duas disposições, na banda de frequência dos 100 Hz. Porém na gama de frequências dos 40 Hz o painel vibra na mesma frequência de oscilação da energia sonora incidente. O painel entra assim em ressonância acústica, isto é, a frequência do som emitido pela fonte é igual à frequência de vibração natural do painel. Naturalmente, como em todo o tipo de ressonância, ocorre uma espécie de amplificação do som, aumentando a intensidade deste. Assim, e apenas nesta frequência, o tempo de reverberação foi calculado para um  $T_{20}$  uma vez que o ruído de fundo se sobrepunha antes da “extinção” do som emitido nesta frequência. O restante espectro de frequências foi calculado para  $T_{30}$ .

### 6.3.2. PAINÉIS COM MATERIAL POROSO ABSORSOR

#### 6.3.2.1 Painel Perfurado Com Lã-de-Rocha de 200 mm (P200)

Uma das configurações utilizadas foi lã-de-rocha de 200 mm com espaçamentos de ar de 195 mm no seu tardo e de 100 mm na frente da lã-de-rocha. O painel é igualmente perfurado com furos de 12 mm de diâmetro espaçados de 100 mm. A Figura 6.10 representa a área de absorção sonora equivalente do elemento posicionado no canto e no meio da câmara reverberante ao longo de todo o espectro de frequências.

Os resultados destas configurações asseguram uma boa absorção nas baixas frequências, mais precisamente na gama dos 100 aos 250 Hz, sobretudo nos elementos localizados nos cantos. A análise da Figura 6.10 permite ainda concluir que a colocação da lã-de-rocha no interior do elemento estimula o aumento da absorção sonora na gama das baixas frequências, ampliando-a. Nas médias/altas frequências, a capacidade de absorção do elemento vai decrescendo gradualmente.

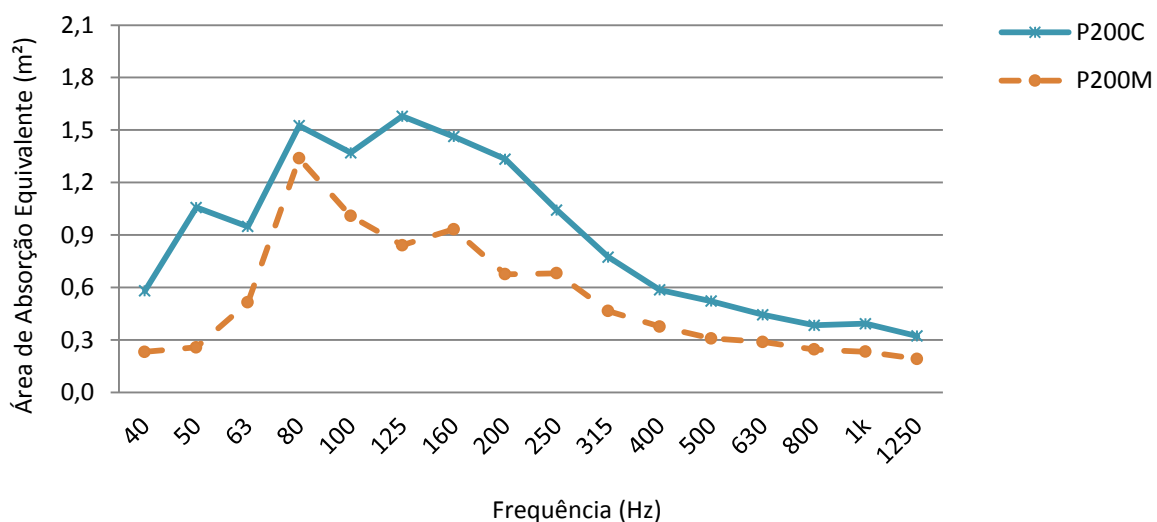


Figura 6.10 - Área de absorção sonora de um painel perfurado com lã-de-rocha de 200 mm -  $A_{obj}$  (m²)

### 6.3.2.2 Painel Perfurado Com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100)

Uma outra configuração utilizada foi lã-de-rocha de 100 mm com espaçamentos de ar de 385 mm na traseira da lã-de-rocha e de 10 mm na sua zona frontal (P100). O painel é igualmente perfurado com furos de 12 mm de diâmetro espaçados de 100 mm. A Figura 6.11 representa a área de absorção sonora equivalente dos elementos localizados nos cantos e ao meio da câmara reverberante.

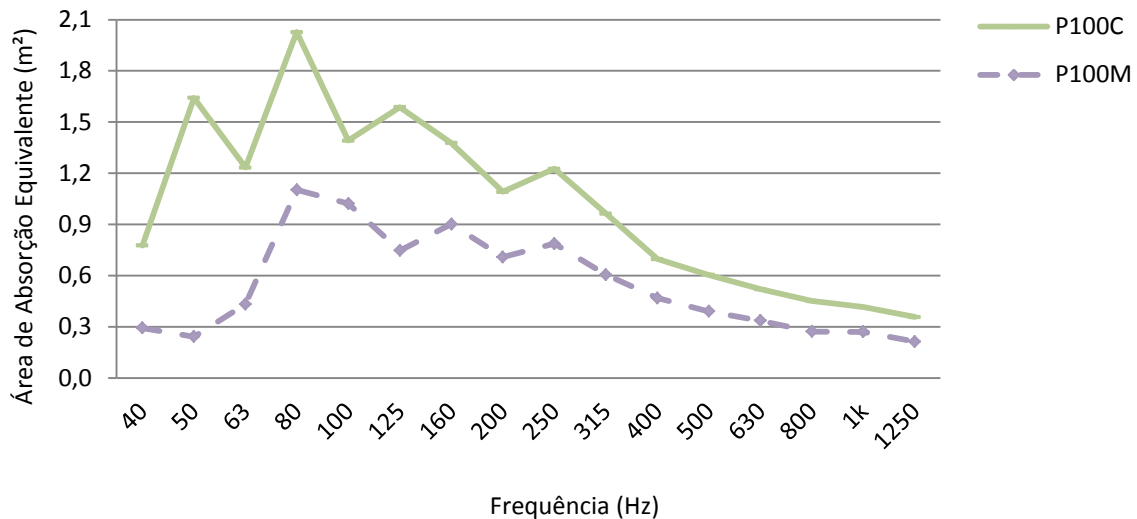


Figura 6.11 - Área de absorção sonora de um painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm -  $A_{obj}$  (m²)

Com base na Figura 6.11 pode-se afirmar que as configurações apresentadas asseguram uma boa absorção nas baixas frequências, mais especificamente na gama dos 50 aos 300 Hz, sobretudo nos elementos localizados nos cantos. O elemento absorvedor (cantos e meio) apresenta assim um comportamento idêntico ao representado na Figura 6.10, isto é, metade da lã-de-rocha e o aumento da caixa-de-ar no tardo de esta apresenta um efeito aproximado ao do elemento anterior. O aumento da caixa-de-ar traduz-se assim na redução da frequência de ressonância do sistema absorvedor e num aumento da absorção sonora máxima. Os picos de absorção máxima deste elemento representam um comportamento de membrana e ressonador do mesmo, devido ao efeito do conjunto da caixa-de-ar de 385 mm, do material absorvedor de 100 mm e do painel perfurado frontal.

### 6.3.2.3 Painel Liso Com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100)

O elemento absorvedor L100 é liso com lã-de-rocha de 100 mm no seu interior e com espaçamentos de ar de 385 mm no seu tardo de e de 10 mm na zona frontal da lã-de-rocha. Os resultados relativos à área de absorção sonora equivalente nos cantos e no meio da câmara são analisados na Figura 6.12.

A observação da Figura 6.12 permite concluir que o elemento absorve uma menor gama de frequências (dos 50 aos 90 Hz) comparativamente aos painéis perfurados com as mesmas características internas.

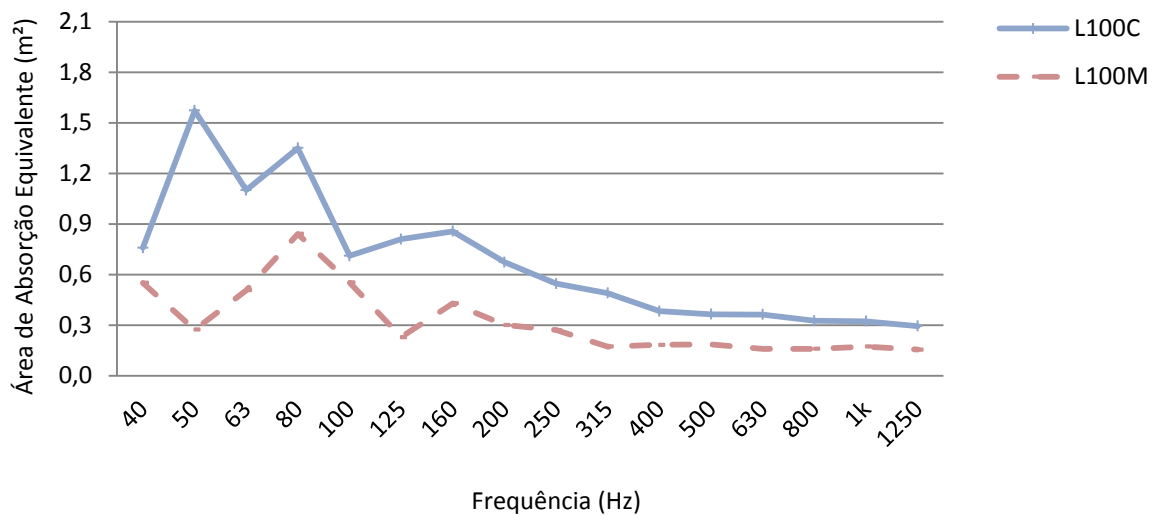


Figura 6.12 - Área de absorção sonora de um painel liso com lã-de-rocha de 100 mm -  $A_{obj}$  (m²)

#### 6.3.2.4 Painel Liso Com Lã-de-Rocha de 200 mm (L200)

O elemento absorvedor L200 apresenta uma membrana frontal lisa e 200 mm de lã-de-rocha no seu interior com espaçamentos de ar de 195 mm no seu tardo e de 100 mm na frente da lã-de-rocha. A Figura 6.13 representa a área de absorção sonora equivalente do elemento ao longo de todo o espectro de frequências, bem como o seu comportamento no canto e ao meio da câmara reverberante.

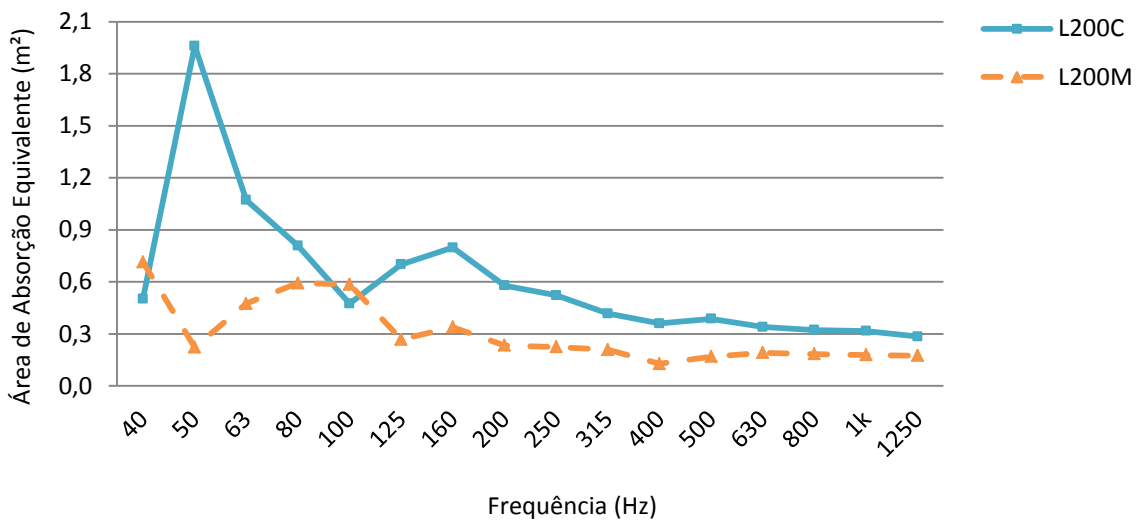


Figura 6.13 - Área de absorção sonora de um painel liso com lã-de-rocha de 200 mm -  $A_{obj}$  (m²)

Através da análise da Figura 6.13 conclui-se que os elementos com painéis lisos com a lã-de-rocha no seu interior apresentam maior pico máximo de absorção nos cantos, contudo a gama de frequências abrangida é menor, aproximadamente dos 50 aos 80 Hz. Percebe-se ainda que ocorre uma translação da curva de valores da absorção sonora quando se altera a posição do elemento para o meio da câmara reverberante.

### 6.3.3. INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE LÃ-DE-ROCHA

#### 6.3.3.1 Objetivo

Na presente secção é analisada a influência da lã-de-rocha no interior dos elementos com membrana de 5 mm de espessura: Lisos e Perfurados. Uma vez que todos os sistemas, sem exceção, apresentaram melhores resultados estando posicionados nos cantos, este estudo é centrado apenas com os elementos nesta disposição.

#### 6.3.3.2 Painéis Lisos

A Figura 6.14 expõe uma análise comparativa das áreas de absorção sonora equivalentes -  $A_{obj}$  ( $m^2$ ), dos painéis lisos (L) sem e com lã-de-rocha (de 100 e de 200 mm).

Analisando a Figura 6.14, observa-se, à partida que a configuração que proporciona a mais ampla gama de absorção é a configuração referente ao elemento com lã-de-rocha de 100 mm. Observa-se ainda que o facto de o elemento conter lã-de-rocha no seu interior torna-se numa mais-valia à absorção de baixas frequências, porque além de aumentar a gama de frequências absorvidas, aumenta o pico de absorção. O comportamento do elemento é ligeiramente otimizado com a colocação de lã-de-rocha de 100 mm e um espaçamento de ar no seu tardo de 385 mm. Este grande espaçamento aliado ao material absorvedor próximo do painel frontal provoca a absorção de baixas frequências, como desejado.

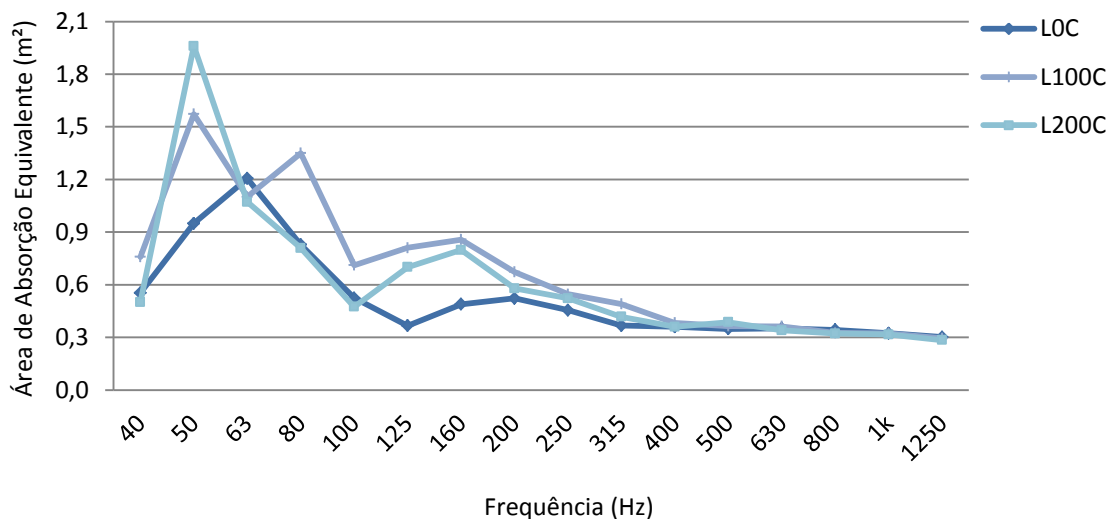


Figura 6.14 - Influência da lã-de-rocha no interior dos painéis lisos de 5 mm de espessura -  $A_{obj}$  ( $m^2$ )

#### 6.3.3.3 Painéis Perfurados

A Figura 6.15 expõe uma análise comparativa das áreas de absorção sonora equivalente dos painéis perfurados sem e com lã-de-rocha (de 100 e de 200 mm).

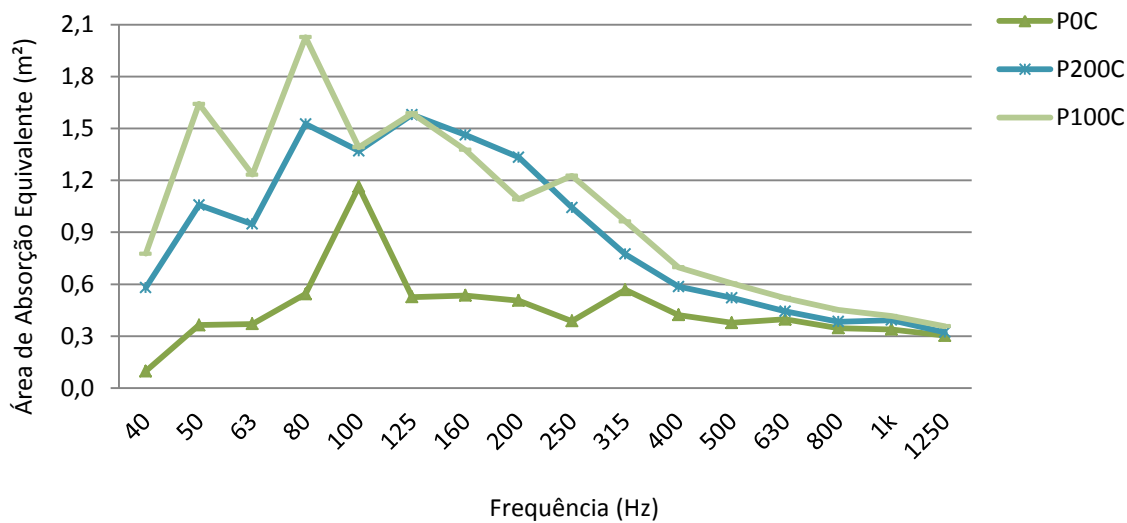


Figura 6.15 - Influência da lã-de-rocha no interior dos painéis perfurados de 5 mm de espessura -  $A_{obj}$  (m²)

Novamente, o facto de se introduzir lã-de-rocha no interior do elemento tem como consequência o alargamento da gama de frequências, dos 50 aos 315 Hz. Os valores de absorção obtidos são ainda bastante superiores aos valores obtidos no painel perfurado sem lã-de-rocha, que apresenta um pico de máxima absorção nos 100 Hz. A análise da Figura 6.15 permite concluir que não há vantagem na utilização da lã-de-rocha de 200 mm com duas caixas-de-ar, comparativamente com o painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm com uma só caixa-de-ar no tardo do elemento, pois este apresenta maior gama de frequências abrangidas e maior pico de absorção.

#### 6.3.4. ANÁLISE COMPORTAMENTAL

Esta análise permite a comparação dos elementos com a sua disposição nos cantos. A análise da Figura 6.16 permite concluir que os painéis perfurados com material poroso absorvedor, especificamente a lã-de-rocha, são mais eficientes relativamente aos restantes painéis, na absorção das baixas frequências. Isto é, abrangem uma maior gama de frequências, aproximadamente dos 50 aos 315 Hz.

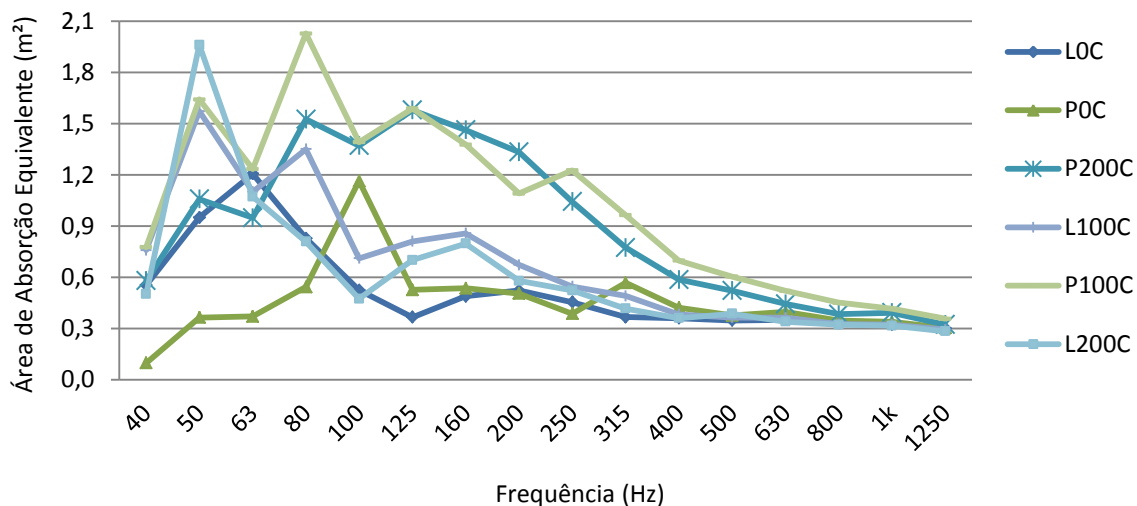


Figura 6.16 – Áreas de absorção sonora equivalentes dos painéis lisos (L) e perfurados (P), com e sem lã-de-rocha (colocados nos cantos) -  $A_{obj}$  (m²)



#### 6.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM CÂMARA REVERBERANTE

Pelos resultados obtidos percebe-se que sem material absorvedor no interior dos elementos, existe diferença na absorção dos painéis lisos ou perfurados. Essa diferença não é tão notória quanto se esperaria, tendo-se verificado a translação da frequência de absorção máxima dos 63 Hz (painéis lisos) para os 100 Hz (painéis perfurados). Refira-se ainda que, após o pico máximo de absorção nos 63 Hz, os painéis lisos sem lã-de-rocha no interior – (L0) e (P0), absorvem menos nas restantes frequências (médias e altas) comparativamente ao painel perfurado, comprovando assim o seu funcionamento como membrana. Por sua vez, o painel perfurado apresenta uma curva de absorção sonora equivalente ( $A_{obj}$ ) mais irregular ao longo de todo o espectro de frequências. Este fenómeno deve-se talvez à excessiva vibração, do painel aquando das entradas e saídas de ar, provando pequenas ressonâncias no sistema.

A bibliografia sugere ainda que a introdução de material absorvedor poroso na caixa-de-ar produz a diminuição da “amplitude de absorção” e o aumento na gama de frequências abrangidas pelo espectro [7]. No entanto, enquanto o segundo efeito é visível nos resultados obtidos, o mesmo não se pode afirmar em relação à diminuição da amplitude de absorção do painel com a inclusão de material absorvedor poroso. Este fenómeno pode ser explicado pela combinação da lã-de-rocha com a espessura da caixa-de-ar utilizada. Na realidade, quer nos painéis lisos, quer nos perfurados, a introdução de lã-de-rocha no elemento melhora as características de absorção, proporcionando um aumento da gama de frequências onde ocorre absorção. Por conseguinte, esta deverá ser uma característica da solução ou soluções finais.

Verifica-se também que a utilização da lã-de-rocha no interior da caixa-de-ar, incrementa significativamente a absorção sonora dos elementos acústicos. Constata-se ainda a importância do posicionamento da mesma junto à face dos painéis perfurados. A utilização de 100 mm de lã-de-rocha permite mais espaço de caixa-de-ar no tardo do painel, traduzindo-se na redução da frequência de ressonância do sistema absorvedor e num aumento da absorção sonora máxima. Por sua vez, o painel de 200 mm de lã-de-rocha posicionada entre duas caixas-de-ar de 100 e 195 mm cada, não garante uma gama tão alargada de absorção. Este fenómeno acontece nos dois tipos de painéis frontais analisados - lisos e perfurados.

A análise de resultados permitiu traçar algumas conclusões quanto ao desempenho acústico destes sistemas. De acordo com os resultados das configurações testadas, são as referentes aos painéis perfurados que apresentam melhor comportamento na absorção de baixas frequências, com ligeira vantagem na utilização de lã-de-rocha de 100 mm (P100C). Quanto às configurações relativas aos painéis lisos, em termos de amplitude de absorção abrangida, a realidade é que acabaram por não se tornar tão vantajosas como os painéis perfurados com material absorvedor.



# 7

## RESULTADOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA”

### 7.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo compara-se o funcionamento nas baixas frequências dos elementos testados, com base nos resultados dos tempos de reverberação obtidos nos ensaios executados na câmara reverberante E1 do Laboratório de Acústica da FEUP (simulando sala real). O interior da câmara reverberante foi preenchido com materiais de forma a simular um comportamento idêntico ao de uma sala real. Analisou-se apenas um cenário de disposição (aquele que obteve melhores resultados nos ensaios em câmara reverberante) para cada conjunto de elementos: quatro painéis colocados nos cantos da “sala” (Figura 7.1 e 7.2).

Testaram-se dois casos de elementos nos cantos: painel liso (L) e painel perfurado (P), ambos com lã-de-rocha de 100 mm, a fim de verificar possíveis alterações nas características de absorção dos elementos.



Figura 7.1 - Disposição C dos painéis na simulação de uma “sala real”: painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante [Fotografia da Autora]

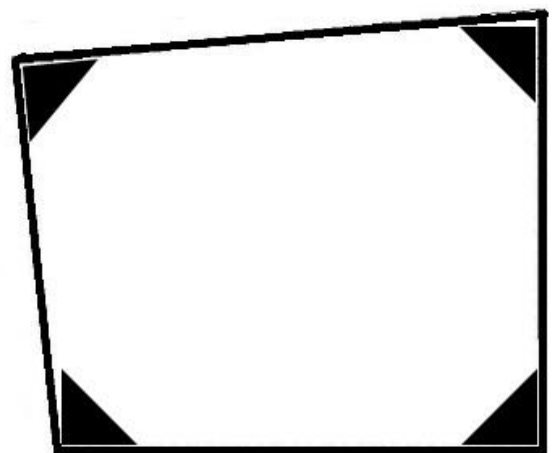


Figura 7.2 – Esquema dos painéis distribuídos pelos cantos da câmara reverberante

As análises e comparações efetuadas foram feitas tendo em conta a influência da variação do painel frontal dos elementos ao longo dos ensaios. Pretende-se assim chegar a conclusões que permitam sustentar a escolha de uma solução que demonstre potencial e capacidade de absorção nas frequências mais baixas.

## 7.2. ENSAIOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA”

### 7.2.1. ENSAIOS REALIZADOS

Ensaíram-se duas configurações de elementos absorvedores, a fim de determinar qual a mais eficaz na absorção de baixas frequências: painel perfurado com 100 mm de lã-de-rocha e painel liso com 100 mm de lã-de-rocha (Quadro 7.1). Novamente, calcularam-se os valores da área de absorção sonora da “sala acusticamente pequena” enquanto vazia ( $A_0$ ), e em cada ensaio foram analisados quatro conjuntos de painéis.

Quadro 7.1 - Ensaio realizados em “sala acusticamente pequena”

Código	Painel Frontal	Descrição do Interior	Disposição na “Sala”
P100	Perfurado	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Cantos
L100	Liso	Com Lã-de-Rocha de 100 mm	Cantos

Mais uma vez, para cada uma das configurações apresentadas, calculou-se a área de absorção sonora equivalente de cada elemento -  $A_{obj}$  ( $m^2$ ), o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_1$ ) referente à área frontal do painel (1,1  $m^2$ ), e o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha_2$ ) referente às faces visíveis do painel (1,3575  $m^2$ ).

### 7.2.2. RESULTADOS

#### 7.2.2.1 Área de Absorção Sonora Equivalente ( $A_{obj}$ )

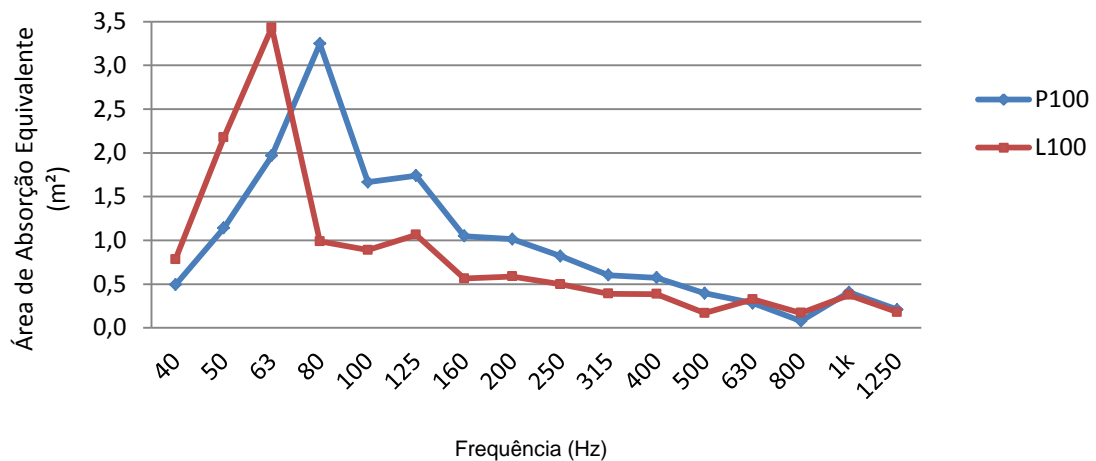
A área de absorção sonora equivalente medida para cada elemento ( $A_{obj}$ ) das configurações indicadas no Quadro 7.1, são apresentadas, por banda de terço de oitava, no Quadro 7.2 e na Figura 7.3. Os valores indicados não incluem a presença dos elementos que mobilam a sala.

Quadro 7.2 - Área de absorção sonora equivalente -  $A_{obj}$  ( $m^2$ )

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
P100	0,5	1,1	2,0	3,2	1,7	1,7	1,0	1,0
L100	0,8	2,2	3,4	1,0	0,9	1,1	0,6	0,6

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
P100	0,8	0,6	0,6	0,4	0,3	0,1	0,4	0,2
L100	0,5	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2

Figura 7.3 - Área de absorção sonora equivalente -  $A_{obj}$  ( $m^2$ )

#### 7.2.2.2 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_1$ )

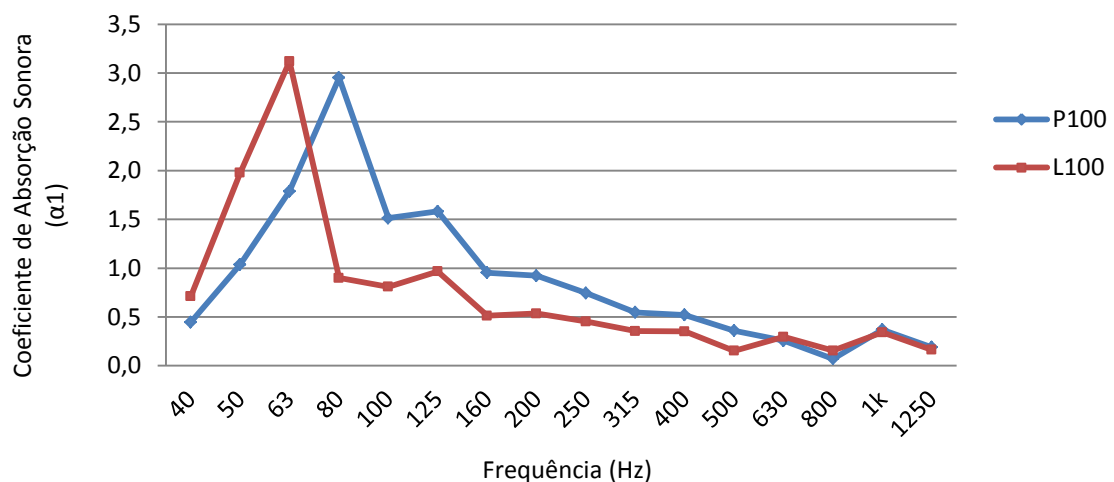
O “coeficiente” de absorção sonora -  $\alpha_1$  ( $m^2$  de área frontal), medido para cada configuração indicada no Quadro 7.1, é apresentado por banda de terço de oitava, no Quadro 7.3 e na Figura 7.4.

Quadro 7.3 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ )

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
P100	0,45	1,04	1,79	2,95	1,51	1,58	0,95	0,92
L100	0,71	1,98	3,12	0,90	0,81	0,97	0,51	0,53

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
P100	0,74	0,55	0,52	0,36	0,26	0,07	0,37	0,19
L100	0,45	0,36	0,35	0,15	0,30	0,16	0,34	0,16

Figura 7.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_1$ )

7.2.2.3 Coeficiente de Absorção Sonora ( $\alpha_2$ )

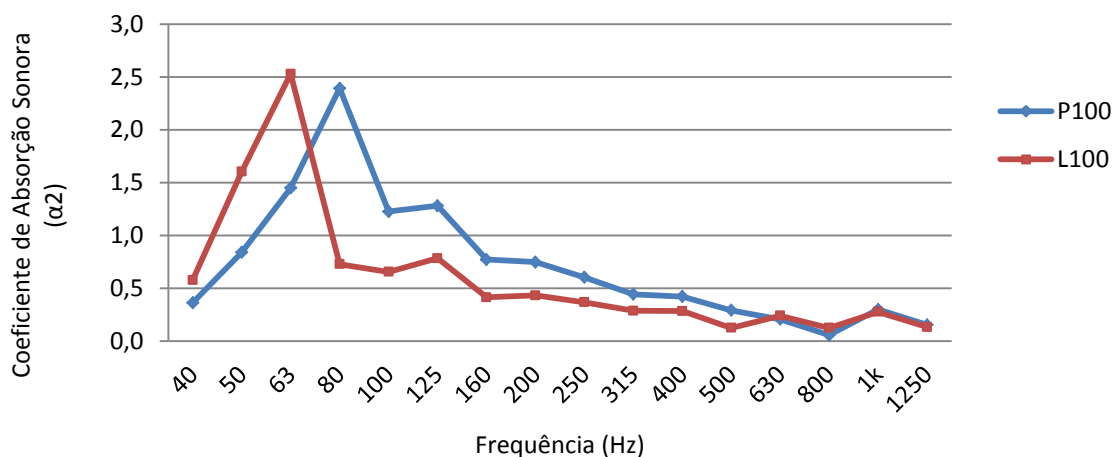
O coeficiente de absorção sonora -  $\alpha_2$  (m<sup>2</sup> de área total exposta) medido para cada configuração indicada no Quadro 7.1, é apresentado por banda de terço de oitava no Quadro 7.4 e na Figura 7.5.

Quadro 7.4 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ )

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	40	50	63	80	100	125	160	200
P100	0,36	0,84	1,45	2,39	1,23	1,28	0,77	0,75
L100	0,58	1,60	2,53	0,73	0,66	0,78	0,42	0,43

Painel	Banda de Frequências (Hz)							
	250	315	400	500	630	800	1k	1250
P100	0,60	0,44	0,42	0,29	0,21	0,06	0,30	0,15
L100	0,37	0,29	0,28	0,12	0,24	0,13	0,28	0,13

Figura 7.5 - Coeficiente de absorção sonora de cada configuração ( $\alpha_2$ )

Identicamente ao sucedido nos ensaios realizados em câmara reverberante, os resultados obtidos em sala “acusticamente pequena” apresentam valores de coeficiente de absorção sonora superiores à unidade na gama de frequências mais baixas (dos 50 aos 200 Hz aproximadamente). Este fenómeno, fisicamente impossível, dever-se-á à sobrestimação dos valores de absorção quando se despreza o volume dos materiais ocupados pelos elementos no decorrer dos ensaios.

### 7.3. RESULTADOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA”

#### 7.3.1. OBJETIVO

Na presente secção são feitas comparações relativas ao comportamento acústico de ambos os painéis em “sala acusticamente pequena”. O objetivo do presente estudo consiste numa análise de possíveis alterações nas características de absorção do elemento quando inserido numa sala “real”.

#### 7.3.2. RESULTADOS

##### 7.3.2.1 Objetivo

Através da observação da Figura 7.6 referente à área de absorção sonora equivalente ( $A_{obj}$ ) dos painéis liso (L) e perfurado (P) com lã-de-rocha de 100 mm, percebe-se que ocorre uma translação da curva de valores da absorção sonora quando se modifica o painel frontal. Como esperado o painel liso (L) absorve uma gama de frequências mais baixa (efeito membrana) e apresenta um pico máximo de absorção situado na gama dos 55 Hz, aproximadamente. O painel perfurado (P), por sua vez, absorve maior gama de frequências ao longo de todo o espectro, situando-se o pico máximo de absorção na gama dos 80/90 Hz, aproximadamente.

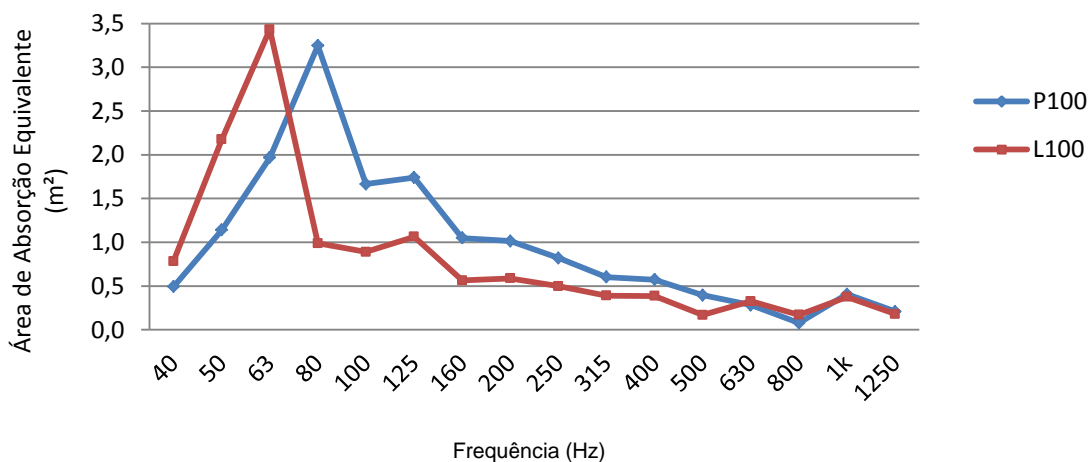


Figura 7.6 - Área de absorção sonora equivalente -  $A_{obj}$  (m²)

##### 7.3.2.2 Painel Perfurado com Lã-de-Rocha de 100 mm (P100)

A Figura 7.7 representa a área de absorção sonora do mesmo painel (P100) em duas situações diferentes: câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP e na simulação (feita igualmente em câmara reverberante mais pequena e do mesmo Laboratório) em “sala acusticamente pequena”.

A análise da Figura 7.7 permite concluir que o painel perfurado P100 apresenta um comportamento idêntico ao longo de todo o espectro. Isto é, apesar do elevado aumento da área de absorção sonora na gama dos 80 Hz, a gama de frequências abrangidas e o pico máximo de absorção continuam idênticos.

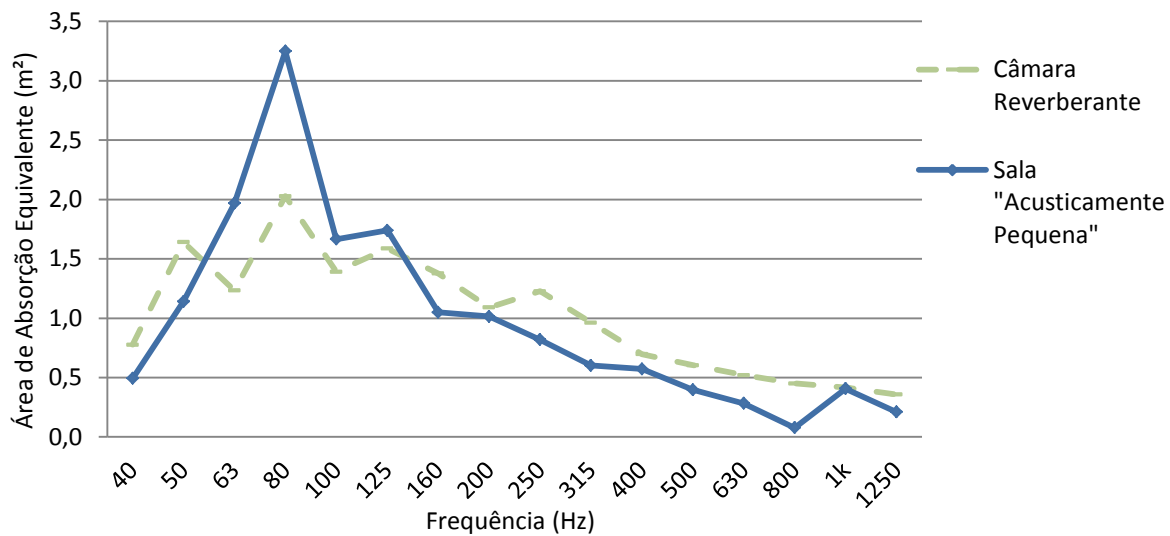


Figura 7.7 - Área de absorção sonora ( $A_{obj}$ ) do painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100)

### 7.3.2.3 Painel Liso com Lã-de-Rocha de 100 mm (L100)

A Figura 7.8 representa a área de absorção sonora do mesmo painel (L100) em duas situações diferentes: câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP e na simulação em “sala acusticamente pequena”.

Identicamente ao comportamento do painel P100, o painel L100 apresenta um pico máximo de absorção mais acentuado na gama dos 63 Hz na “sala acusticamente pequena”, funcionando como um sistema tipo membrana.

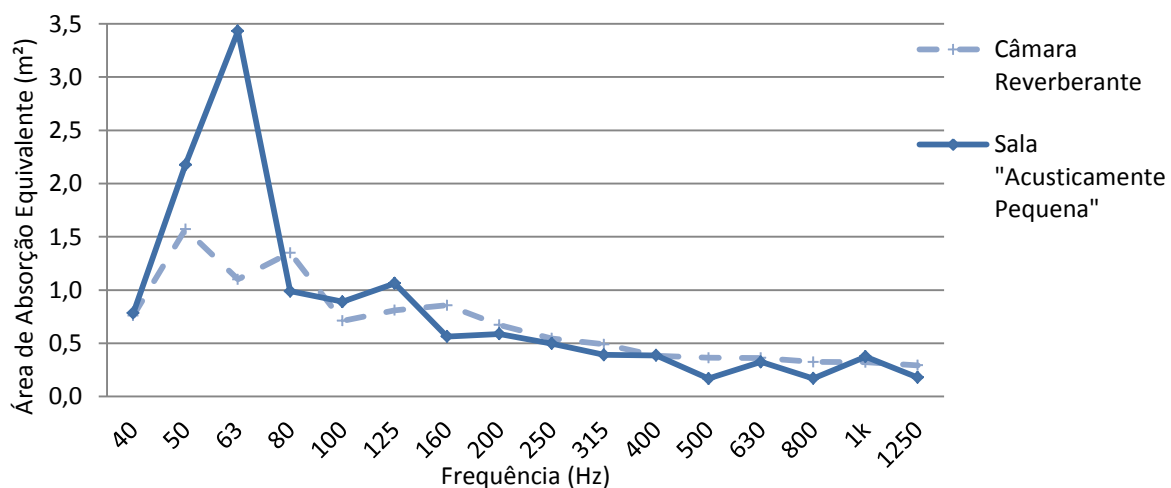


Figura 7.8 - Área de absorção sonora ( $A_{obj}$ ) do painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100)



#### **7.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS EM “SALA ACUSTICAMENTE PEQUENA”**

Os elementos foram escolhidos considerando os critérios de bom comportamento acústico, e os resultados obtidos na absorção de baixas frequências nos ensaios em câmara reverberante. Assim, escolheram-se duas configurações com melhores valores de absorção de baixas frequências, e a mais ampla gama de absorção ao longo de todo o espectro de frequências (P100 e L100).

Após análise dos resultados obtidos em sala “acusticamente pequena” e verificado o comportamento dos painéis neste espaço e em câmara reverberante, conclui-se que ambos os elementos (P100 e L100) apresentam um bom desempenho acústico, essencialmente na gama das baixas frequências.

Como previsto, o painel liso com lã-de-rocha de 100 mm (L100) apresenta menor frequência de ressonância (55 Hz aproximadamente) comparativamente ao painel perfurado (P100) com as mesmas características (80/90 Hz aproximadamente). No entanto, a gama de frequências abrangida pelo espectro é maior no painel frontal perfurado.

O pico acentuado de absorção máxima nos dois painéis analisados dever-se-á às dimensões de área exposta de material. Proporcionalmente existe maior absorção na sala “acusticamente pequena”. Poderá ser ainda devido aos modos próprios da sala associados à sobreposição de ondas sonoras.

Identicamente aos resultados obtidos em câmara reverberante, as configurações relativas ao painel liso (L100), em termos de amplitude de absorção abrangida, são menos vantajosas que as relativas aos painéis perfurados (P100) com as mesmas características. Contudo, deve-se ter em consideração a frequência crítica de uma sala, isto é, a frequência que apresenta picos de ganho impossibilitando ouvir todo o espectro de frequências com a mesma intensidade. O correto procedimento seria fazer a análise da homogeneidade do campo sonoro no espaço (não feito por restrições temporais) de forma a conhecer a frequência crítica deste. Se a frequência crítica do espaço se situar abaixo dos 100 Hz, é vantajoso utilizar o painel liso (L100), uma vez que este atua com mais eficácia nestas frequências. Caso a frequência crítica esteja situada a partir dos 100 Hz, dever-se utilizar o painel perfurado P100, pois apresenta melhores características de absorção nestas frequências.



## 8 CONCLUSÕES

### 8.1. CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo deste trabalho consistiu na caracterização de absorvedores sonoros de baixas frequências e no estudo do seu desenvolvimento. E, para atingir este objetivo juntou-se a colaboração e o interesse da firma *Castelhano & Ferreira*, em desenvolver um produto destinado essencialmente a pequenas salas sob o ponto de vista acústico: estúdios de gravação, salas de ensino e prática de música, *home-cinemas*, pequenos espaços para conferências e projeções, etc.. Ou seja, um produto aplicável em locais onde os modos próprios nas baixas frequências são um problema acústico.

Começou-se por destacar as falhas normalmente existentes neste tipo de espaços, sendo certo que a gama de frequências que mais dificuldade apresenta no seu tratamento é a das baixas frequências, que pode atingir picos de ganho dos 20 aos 200 Hz – essa gama é a gama mais problemática nas salas de audição críticas. Nestes casos há ressonância devido à criação de modos próprios e passam a existir zonas da sala com pequenas amplificações e atenuações face à média. Por isso, o som não é detetado uniformemente em diferentes pontos da sala. Ora, para garantir uma audibilidade adequada, é necessária uma resposta em frequência tanto mais próxima quanto possível da ideal. E sabe-se da dificuldade: os fatores que impedem uma resposta em frequência ideal são os modos acústicos, evidenciados na curva de resposta em frequência de uma sala.

Assim apresentaram-se algumas noções teóricas necessárias ao desenvolvimento do presente trabalho. Na temática de correção acústica, evidenciaram-se os vários mecanismos de absorção sonora, bem como a sua gama de frequências mais eficazes (materiais porosos nas altas frequências, ressoadores de cavidade nas médias/altas frequências e membranas nas baixas frequências). Descreveram-se alguns parâmetros acústicos caracterizadores da absorção sonora, introduzindo-se simultaneamente o conceito de tempo de reverberação, necessário à determinação das características de absorção de elementos (área de absorção sonora equivalente e coeficiente de absorção sonora).

Fez-se o estudo e pesquisa dos tipos de absorvedores sonoros de baixas frequências existentes no mercado internacional (*bass-traps*, *bass-corners*, *tube-traps*): formas, dimensões usuais, características internas e externas e respetivo comportamento e eficiência. Finalmente, direcionou-se o presente estudo no sentido de criar elementos absorvedores com características de absorção sonora apenas nas baixas frequências de modo a manter um espectro de frequências com a mesma intensidade em toda a gama de frequências.

Para conseguir uma intervenção otimizada nesta gama de frequências, optou-se por um absorvedor de baixas frequências de canto, em que o *design* dos elementos desenvolvidos foi baseado no conceito do de *bass-corner* existente. Os protótipos idealizados apresentam 110 cm de altura, 100 cm de largura e

51,5 cm de profundidade. Possuem características modulares para possibilitar a utilização de vários tipos de painéis frontais e permitir a alteração das características internas do painel.

Desenvolveram-se ainda dois tipos de painéis frontais (retangulares) de 5 mm de espessura: um perfurado (P) com orifícios de 12 mm de diâmetro espaçados de 100 mm e o outro liso (L). Em ambos fizeram-se variar as características internas do sistema absorvedor: caixa-de-ar e introdução de material poroso absorvedor de 100 e 200 mm (lã-de-rocha).

O facto dos elementos absorvedores deverem estar localizados nos cantos da sala deve-se à máxima pressão concentrada nesta zona, porque qualquer onda sonora, ao atingir um canto, é redirecionada para a fonte, independentemente do ângulo de incidência. Ou seja, os modos próprios têm uma máxima pressão nos cantos e a velocidade das partículas é muito baixa. Daí a escolha da localização dos elementos, pois a absorção é aí bastante mais eficaz.

Os ensaios, baseados na norma NP EN ISO 354, foram realizados na câmara reverberante R1 do Laboratório de Acústica da FEUP. Analisaram-se as possíveis combinações de elementos frontais, com e sem a presença de lã-de-rocha e com as duas espessuras diferentes (100 e 200 mm) e fizeram-se comparações entre os resultados obtidos. Para o efeito, utilizaram-se os resultados das várias configurações, nomeadamente no que respeita à disposição do elemento na câmara reverberante (cantos e meio), à introdução de um painel frontal liso ou perfurado, à utilização, ou não, de material poroso absorvedor no seu interior, e finalmente, à sua espessura mais conveniente.

Concluiu-se que os elementos sem lã-de-rocha no seu interior são mais eficazes na absorção de baixas frequências quando apresentam um painel frontal liso, aliado à caixa-de-ar constituída por toda a profundidade do painel – membrana ressonante. Por sua vez, os painéis perfurados não apresentam um comportamento tão eficaz, chegando mesmo a fazer ressonância na gama de frequências dos 40 Hz, porque o painel vibra na mesma frequência de oscilação da energia sonora incidente. Logo, os elementos perfurados sem qualquer tipo de material absorvedor no interior, apresentam-se quase sem aplicação prática, porque não possuem vantagem em termos de absorção nas baixas frequências em relação ao painel liso.

Concluiu-se ainda que a absorção sonora nas baixas frequências pode ser ampliada através da introdução de um amortecimento adicional na caixa-de-ar, isto é, com a introdução da lã-de-rocha. Uma grande vantagem da disposição dos painéis nesta zona de uma sala tem a ver com o aproveitamento da caixa-de-ar no tecto do painel. O coeficiente de absorção sonora aumenta de uma forma muito acentuada nas baixas frequências, até cerca de 500 Hz com o aumento da caixa-de-ar.

Fez-se um estudo comparativo da espessura mais eficaz da lã-de-rocha e respectivas caixas-de-ar, juntamente com o painel frontal mais indicado. Suposto isto, conclui-se que um painel frontal liso com lã-de-rocha no seu interior aumenta a gama de frequências absorvidas, embora não muito significativamente (50 aos 90 Hz), bem como o pico máximo de absorção. Conclui-se também que a configuração que proporciona uma mais ampla gama de absorção é a referente ao painel liso com lã-de-rocha de 100 mm e uma caixa-de-ar no seu tecto de 385 mm.

A variação das características efectuadas nos elementos com painéis perfurados permitiu a conclusão de que a lã-de-rocha no interior do painel aumenta a gama de frequências abrangida pelo espectro, sendo alargada dos 50 aos 315 Hz. Os valores de absorção obtidos são ainda bastante superiores aos valores obtidos no painel perfurado sem lã-de-rocha.

Relativamente à posição do material absorvente no interior do elemento absorvedor, verifica-se que, quer o elemento frontal seja liso ou perfurado, o seu comportamento na absorção de baixas frequências é semelhante. Contudo, existe uma ligeira vantagem ao utilizar uma espessura de 100 mm com caixa-de-

ar de 385 mm, ao invés de uma espessura da lã-de-rocha de 200 mm com duas caixas-de-ar de 100 e 195 mm.

Após a análise de cada uma das configurações ensaiadas, conclui-se que a configuração que demonstra maior gama de absorção nas baixas frequências é o painel perfurado com lã-de-rocha de 100 mm (P100), porquanto apresenta melhores valores de área de absorção sonora equivalente ( $A_{obj}$ ).

As configurações com melhor comportamento acústico nos ensaios realizados em câmara reverberante foram escolhidas para os ensaios em sala “acusticamente pequena”, a fim de determinar eventuais alterações das características de absorção dos referidos painéis.

Os ensaios realizados em sala “acusticamente pequena” vieram confirmar os resultados obtidos em câmara reverberante, pois ambos os painéis sujeitos a este ensaio (P100 e L100) apresentaram um bom comportamento acústico nas baixas frequências. São os painéis que apresentam maior taxa de absorção e abrangem uma ampla gama de frequências. Concluiu-se ainda que, se se pretende atuar numa sala cujas frequências críticas vão desde os 45/50 até aos 100 Hz, dever-se-á utilizar o painel liso L100, caso se pretenda atuar a partir dos 100 até aos 250/300 Hz dever-se-á utilizar o elemento com painel perfurado P100, porquanto apresenta melhores características de absorção nestas frequências.

Note-se que a absorção dos painéis vai decrescendo nas altas frequências, garantindo desta forma uma uniformidade do som numa sala, pois os elementos criados absorvem os picos de ganho existentes nas baixas frequências.

## 8.2. LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES

A caracterização dos elementos desenvolvidos, apresenta naturalmente, algumas limitações e potencialidades associadas.

Uma das principais limitações enfrentadas no decorrer dos ensaios teve a ver com o elevado peso e volume dos elementos absorvedores. Cada um pesa aproximadamente 48 kg, e tem um volume de 0,283 m<sup>3</sup>. São elementos pesados e difíceis de movimentar, sendo necessárias duas pessoas para o fazer.

Apesar do volume e dimensões dos elementos, o facto de ter sido idealizado com o objetivo de se localizar no canto de uma sala, permite alguma economia de espaço.

Relativamente ao estudo e desenvolvimento dos elementos absorvedores realizados, registaram-se ainda limitações de tempo. O próprio atraso na entrega do material bem como o tempo de montagem em laboratório não permitiu uma análise mais exaustiva em câmara reverberante.

Mais do que os resultados obtidos, que são bastante interessantes, a abordagem utilizada, no que se refere ao conceito de elementos modulares, revela potencial e boas características de absorção de baixas frequências na maior parte dos painéis.

Existe ainda uma incerteza/imprecisão associada aos resultados obtidos nas medições de baixas frequências pois, apesar do volume da câmara reverberante (207 m<sup>3</sup>) as suas dimensões poderão limitar um pouco a amplitude das ondas sonoras abaixo dos 100 Hz. Contudo, as medições foram feitas variando as posições dos microfones e fontes sonoras de forma a garantir uma repetibilidade e homogeneidade dos resultados. Para cada elemento absorvedor e para cada disposição realizaram-se 16 medições.

### **8.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Embora os objetivos inicialmente propostos tenham sido cumpridos, a nível de desenvolvimento e caracterização de painéis modulares absorvedores de baixas frequências, o presente trabalho poderá ser a base de futuros desenvolvimentos de modo a completá-lo.

Fez-se uma abordagem mais técnica no desenvolvimento dos elementos absorvedores, favorecendo-se o desempenho acústico. O custo económico foi também tomado em consideração, razão pela qual se optou pela abordagem de elementos modulares. Contudo, não se realizou um verdadeiro estudo de viabilidade técnico-económica, que implicaria a avaliação do tempo e custo de produção dos elementos e do material utilizado, bem como o estudo mais apurado do comportamento acústico dos elementos para tomada de decisão no desenvolvimento de elementos mais baratos e eficazes.

Seria ainda interessante que o presente estudo continuasse, fazendo alterar novas características, como por exemplo a influência da variação da espessura dos painéis frontais na absorção das baixas frequências, a utilização de diferentes materiais porosos absorvedores no interior dos painéis, a alteração da área perfurada no caso dos painéis perfurados, tipo de furação, utilização de outros materiais que não o MDF (outros tipos de madeira, plásticos, tecidos, etc.).

Por último, a criação de um catálogo de soluções tipo para salas acusticamente pequenas, permitiria a possibilidade de tratamento do referido espaço. Com o objetivo de implementar uma solução acústica ao local, o catálogo poderia funcionar com base no tipo de utilização, características, frequências mais críticas, etc.

Uma vez que o tema do presente trabalho está em clara expansão, considerando que são poucas as empresas portuguesas que produzem este tipo de sistema absorvedor, seria interessante e desafiador apostar nesta área, porquanto apresenta boas potencialidades para o aproveitamento de novas oportunidades de mercado que – deseja-se – em breve satisfaçam os interesses de fabricantes e consumidores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Patraquim, R., *Painéis Acústicos Perfurados em Madeira: Estudo e Avaliação Experimental de Soluções*, Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Lisboa, Junho 2008.
2. Carvalho, A. P. O., *Acústica Ambiental e de Edifícios v8.3*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
3. *Bass-trap*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Bass\\_trap](http://en.wikipedia.org/wiki/Bass_trap). Consultado em Março de 2013.
4. Salas acústicas. <http://audiolist.org/forum/kb.php?mode=article&k=76>. Consultado em Março de 2013.
5. Salas acústicas. [http://saber.sapo.pt/wiki/Imagem:Concha\\_Acustica\\_Centro\\_Cultural](http://saber.sapo.pt/wiki/Imagem:Concha_Acustica_Centro_Cultural). Consultado em Março de 2013.
6. Everest, F.A., *The Master Handbook of Acoustics* – Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
7. TECNIWOOD, *Algumas Noções de Acústica*, Lisboa, 2007.
8. Ondas acústicas. <http://www.sofisica.com.br/conteudos/Ondulatoria/Acustica>. Consultado em Março de 2013.
9. Oliveira, P., *Desenvolvimento e Caracterização Acústica de Elementos Autoportantes para Absorção Sonora em Espaços tipo Open Space*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Construções de Engenharia Civil, Julho 2009.
10. Ondas eletromagnéticas. <http://samuelrobaert.blogspot.pt/2011/10/uma-onda-eletromagnetica-na-faixa-do.html>. Consultado em Março de 2013.
11. Patraquim, R. e Patrício, J., *Condicionamento Acústico Interior. Modelação e Avaliação Experimental da Absorção Sonora de Sistemas com Painéis de Madeira Perfurados*, Revista de Acústica, Vol. 39, Nº 3 e 4, 2008.
12. Impedância acústica. [http://pt.wikipedia.org/wiki/Imped%C3%A2ncia\\_ac%C3%Bastica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Imped%C3%A2ncia_ac%C3%Bastica). Consultado em Março de 2013.
13. Patrão, A., *Caracterização Acústica de Salas de Ensaio – Estudo de Caso*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Construções de Engenharia Civil, Julho 2010.
14. Castelhamo & Ferreira, *Catálogo de Produtos – Painéis de Correção Acústica em Madeira*, Outubro 2011.
15. Hodgkin, M., Morita e W., Köhn, B., *Tratamento de Modos Acústicos em Salas de Audição Crítica*, Monografia apresentada à Escola da Universidade de São Paulo para conclusão do curso de Engenharia de Computação, 2009.
16. Modos de ressonância e ondas em recintos – Diagrama de Bolt. <http://unicist.org/ucu-102/modos-de-resonancia-y-ondas-estacionarias-en-recintos>. Consultado em Abril de 2013.
17. Cox, T. e D'Antonio, P., *Acoustic Absorbers and Diffusers – Theory, Design and Application*, Spon Press, Londres, 2004.
18. *Bass-traps*. <http://www.skumacoustics.com/lang-pt/4-bass-traps>. Consultado em Março de 2013.
19. *Bass-traps*. <http://www.vicoustic.com/vn/Musicbroadcast/produtoscatsub1.asp?cmd=reset&Id=31>. Consultado em Março de 2013.
20. *Bass-traps*. <http://www.realtraps.com/products.htm>. Consultado em Março de 2013.

21. *Tube-traps*. <http://www.tubetrap.com/tubetrap-setup.htm>. Consultado em Março de 2013.
22. *Tube-traps*. <http://acousticsscience.com/tubetraps>. Consultado em Março de 2013.
23. Domingues, O., *A Acústica nos Edifícios – Materiais e Sistemas Absorventes Sonoros*, LNEC, Lisboa, 2005.
24. Portela, M., *Materiais Acústicos – Conceitos para a Acústica Arquitetónica*, Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
25. Absorção Acústica. <http://www.acousticmodelling.com> (*software*). Consultado em Abril de 2013.
26. Documento interno da *Castelhano & Ferreira* de 23 de Maio de 2013.
27. NP EN ISO 354:2007 – *Acústica. Medição da Absorção Sonora em Câmara Reverberante*.
28. Maio, D., *Desenvolvimento de “Tinta” com Pó de Cortiça com Desempenho Acústico Otimizado*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Construções de Engenharia Civil, Julho 2010.
29. NP EN ISO 266:1997 – *Acústica. Frequências Preferenciais*.